

УДК 629.78:007.51:681.51:004.5:004.89:004.822:004.94:528.94:519.17

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫХ КАРТ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК НА МАРШРУТАХ ЛУНОХОДОВ  
ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ КОСМОНАВТАМИ ТОЧНОСТИ  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО НАВИГАЦИОННЫМ МАЯКАМ****М.М. Князьков, М.В. Михайлюк, Б.И. Крючков, В.А. Довженко,  
Ю.А. Бубеев, В.М. Усов**

Канд. техн. наук М.М. Князьков (ИПМех РАН)

Докт. физ.-мат. наук, проф. М.В. Михайлюк (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН)

Докт. техн. наук Б.И. Крючков; канд. техн. наук, доц. В.А. Довженко  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)Докт. мед. наук, проф. Ю.А. Бубеев; докт. мед. наук, проф. В.М. Усов  
(ГНЦ РФ – ИМБП РАН)

В будущих роботизированных исследованиях Луны планирование траекторий перемещения лунохода для последующего их отслеживания в режиме реального времени относится к числу наиболее ответственных этапов обеспечения безопасности напланетной внекорабельной деятельности. Ввиду рисков коллизий с естественными и искусственными объектами на поверхности Луны космонавтам необходимо изучать условия возникновения проблемных ситуаций, в частности, распознавать и идентифицировать непредусмотренные отклонения лунохода от заданного маршрута. Для улучшения восприятия космонавтами актуальной информации о местоположении лунохода и контроля точности позиционирования могут применяться методы построения дорожной карты на базе графоаналитических моделей. Использование дорожных карт со специальной разметкой маршрутов может рассматриваться как актуальное направление прикладных исследований, направленное на повышение безопасности применения лунных роверов для транспортировки полезных грузов и перемещения членов космического экипажа. На основе анализа литературных данных был произведен поиск прототипов программно-моделирующих комплексов, с помощью которых предлагается выполнять построение и разметку дорожной карты, реализуя глобальный алгоритм маршрутизации лунохода и анализируя варианты возможных способов преодоления (обхода) препятствий. Применение вычислительных методов для построения дорожной карты и использование графических форм представления предпочтительного маршрута создают благоприятные предпосылки для визуальной навигации лунохода.

**Ключевые слова:** роботизированное освоение Луны, космический экипаж, напланетная внекорабельная деятельность, луноход, маршрутизация района Луны, графоаналитические методы построения дорожной карты, навигационные маяки, визуальная навигация

**Use of Graph Analytic Techniques for Roadmapping and Marking the Control Points on the Lunar Rover's Routes for Cosmonauts to Track the Positioning Accuracy by Navigation Beacons. M.M. Knyazkov, M.V. Mikhaylyuk, B.I. Kryuchkov, V.A. Dovzhenko, Yu.A. Bubeev, V.M. Usov**

In future robotic exploration of the Moon, planning the trajectories of the lunar rover for their subsequent tracking in real time is one of the most important stages in ensuring the safety of extravehicular activity on the surface of the planet. Due to the risks of collisions with natural and artificial objects on the surface of the Moon, cosmonauts should study the conditions for the occurrence of problem situations, in particular, recognize and identify unforeseen deviations of the lunar rover from a given route. To improve the perception by cosmonauts of live data on the location of the lunar rover and control the positioning accuracy, methods of building a roadmap based on graph analytic models can be used. The use of road maps with special route markings can be considered as an urgent area for applied research aimed at improving the safety of using lunar rovers to transport payloads and expedition members. Based on the literature data analysis, a search was made for prototypes of software-modeling complexes, which are proposed to be used to generate and mark a roadmap by implementing a global lunar rover routing algorithm and analyzing options to bypass obstacles. The use of computational methods for generating a roadmap and graphical representation of the preferred route creates favorable prerequisites for the visual navigation of the lunar rover.

**Keywords:** robotic lunar exploration, space crew, extravehicular activity on the planet surface, lunar rover, routing of the Moon area, graph analytic methods for road mapping, navigation beacons, visual navigation

## **Введение**

Перспективные планы роботизированного освоения Луны повышают актуальность исследований вопросов человеко-машинного взаимодействия при выполнении операций напланетной внекорабельной деятельности (ВнеКД), в том числе при решении ранее не изученных в полном объеме автоматических режимов управления и навигации мобильных роботизированных транспортных средств. Ожидаемое использование космонавтами лунных роверов (ЛР) для перемещения на значительные расстояния (до десятков и сотен километров) по поверхности Луны в ходе ВнеКД требует новых решений по информационной поддержке выполнения сложных профессиональных операций, предполагающих высокий уровень интеллектуальной поддержки человека. Это особенно значимо для принятия решений в сложной тактической обстановке в условиях слабо развитой навигационной инфраструктуры в окрестности места посадки непосредственно после посадки космического экипажа на Луну и на начальных этапах построения лунной инфраструктуры [1, 2].

Актуальность исследований информационного обеспечения космонавтов в осложненной обстановке возрастает в свете активного внедрения систем и методов искусственного интеллекта (ИИ) в интересах обеспечения

повышенного уровня безопасности. Для снижения рисков коллизий с объектами окружающей среды (в частности, путем уклонения от столкновений в реальном масштабе времени), а также для автоматического управления прохождением маршрута по навигационным ориентирам, в составе ЛР должны быть представлены развитые инструментальные средства выполнения разведки и локальной навигации. Построение на этой основе картины мира с помощью технологий ИИ предшествует принятию решения на исполнение действий по выбору маневра на маршруте, предустановленном на стадии планирования миссии ЛР, и одновременно эти данные оперативно отображаются для человека-оператора (ЧО). За космонавтом остается наиболее важная функция на стратегическом уровне планирования и контроля применения транспортного средства – целеполагание, планирование прохождения конкретного маршрута, контроля правильности выбора маневров на маршруте, учета доступных ресурсов для предстоящей операции. При ожидаемом введении в эксплуатацию роботизированных лунных комплексов требуется учет преимуществ естественного интеллекта ЧО в отношении способности глобального видения задач операторской деятельности, возможности целеполагания и глубокого понимания всех нюансов осуществляемой миссии, в том числе при непрогнозируемом изменении обстановки, исчерпании доступных ресурсов, отказах техники и другое.

Исходя из этого положения, для выполнения миссии необходимо наличие предварительного этапа миссии ЛР, на котором уточняются задачи анализа состава возможных действий и выполняются численные расчеты для составления вариантов прохождения маршрутов ЛР, а также получения численных показателей для сравнения маршрутов, то есть информации, необходимой для формирования образных представлений (в формах навигационного образа и образа действий) дорожной карты.

Этот подход в определенной степени перекликается с проводимыми исследованиями последних лет по программе роботизированного освоения Луны, представленными в работе [3]. Согласно этой публикации для программы Artemis потребуются роботизированные автоматические роверы и луноходы с экипажем для поиска и эксплуатации ресурсов, строительства и обслуживания объектов. Роверы должны поддерживать навигацию на расстоянии до десятков километров от базовых лагерей. Концепция научного ЛР Endurance-A для исследования Луны предполагает необходимость преодолеть около 2000 км в бассейне Южного полюса с отдельными переездами на несколько километров между остановками для передачи данных. Эти сценарии миссии ровера требуют функциональности, обеспечивающей бортовое, автономное и глобальное знание местоположения ЛР (также известное как абсолютная локализация). Поскольку на сегодняшний день планетарные роверы не имеют возможности глобальной локализации [3], для них используются методы относительной локализации путем комбинации одометрии колес, визуальной одометрии и инерциальных измерений во время

каждого перемещения, что достаточно для отслеживания положения ЛР относительно начальной точки каждого последующего отрезка маршрута перемещения ровера по лунной поверхности. В цитируемой работе [3] локальную идентификацию ориентиров автономно на борту автомата предлагается выполнять путем обнаружения кратеров на траектории перемещения ровера и сопоставления их с базой данных известных кратеров, заранее нанесенных на карту. В близкой по смыслу публикации [4] локализация ровера относительно таких же ориентиров корректируется с привлечением ЧО в конце каждого отрезка перемещения ЛР. Для этого предлагается способ получения от ЧО обновленной информации о положении ровера в глобальной системе координат путем сопоставления изображений или локальных карт с борта ровера с орбитальными разведывательными изображениями или картами большого региона вокруг текущего положения ровера.

Основная идея локальной навигации состоит в разбиении маршрута ровера на отрезки, маркировки их навигационными ориентирами (маяками), допускающими их визуальное обнаружение и идентификацию бортовыми средствами ровера, что позволяет по достижении каждой последующей отметки скорректировать данные автоматической локализации, задать курсовой угол направления перемещения ровера к следующему маяку и иметь в распоряжении данные о расстоянии до маяка, что также облегчает коррекцию маршрута.

В работе [5] обсуждается вопрос построения напланетной навигационной инфраструктуры для освоения Луны, в частности, района Южного полюса Луны, который является одним из предпочтительных мест для исследования ее поверхности, благодаря обнаружению летучих веществ в постоянно затененных кратерах на полюсах. Потребность применения новых навигационных технологий вытекает из-за особенностей этого места, недостаточной освещенности в сочетании со сложным рельефом местности.

В указанной работе [5] представлена концепция построения системы радиомаяков со встроенными термоэлектрическими генераторами для автономной генерации энергии, устанавливаемых вокруг кратера Шеклтон с учетом особенностей рельефа места посадки.

Аналогичные решения предлагаются в работе [6], в которой рассмотрено развертывание навигационных систем подобного типа для использования в лунных миссиях, что детализировано на примере конкретного района Южного полюса.

В настоящем обзоре ключевые вопросы информационного обеспечения безопасности миссии ЛР с экипажем на борту представлены тремя направлениями:

- 1) интеллектуальная составляющая в профессиональной деятельности космонавта, значимость которой возрастает в свете доминирующих сегодня в экстремальной робототехнике тенденций максимального повышения автономии роботов при их повсеместном применении, в том числе транспортных роботизированных средств;

2) особенности визуальной локальной навигации с использованием навигационных ориентиров (маяков) как возможной базы ведения пространственной ориентировки с применением ИИ с учетом состояния инфраструктуры навигационного обеспечения перемещения мобильных объектов на поверхности Луны;

3) применение графоаналитических алгоритмов маршрутизации района перемещения ЛР с моделированием препятствий для перемещений мобильного робота при задании в интерактивном режиме начальных условий построения дорожной карты.

## **1. Рассмотрение проектных решений по средствам и методам навигации ЛР в свете концепций построения человеко-машинного взаимодействия и распределения функций в роботизированных системах**

### **1.1. Интеллектуальная составляющая деятельности космонавтов при подготовке к выполнению миссий лунных роботов**

Оценка значимой роли интеллектуальной составляющей в деятельности ЧО определяет современные представления о рациональном распределении функций в сложной человеко-машинной системе с высоким уровнем автоматизации в условиях высоких требований к надежности и безопасности ее функционирования. Исторически этот вопрос относится к одному из наиболее глубоко и всесторонне освещенных в литературе, но при этом сегодня не теряет своей новизны и актуальности из-за появления новых поколений образцов транспортных средств и возрастании роли транспортной инфраструктуры в современном обществе. Одной из главных причин интереса исследователей к этой междисциплинарной области знаний являются достижения технологий ИИ, которые находят самое разнообразное применение для улучшения эксплуатационных характеристик автономного транспорта воздушного, подводного и наземного базирования.

Выраженной тенденцией в экстремальной робототехнике является разработка систем управления и навигации мобильных роботов на базе ИИ в интересах повышения уровня автономности, расширения диапазона средств адаптации к сложной внешней среде, что влечет одновременно снижение требований к объему непосредственного вмешательства оператора в обеспечение безопасности перемещения роботизированного транспортного средства посредством ручного управления [7–9].

Одно из перспективных направлений разработки мобильных роботов представлено созданием образцов с автономной системой навигации для которых предусмотрена возможность подключения к управлению оператора через интеллектуальный интерфейс [10–12].

В цитированных работах констатируется, что технологии ИИ используются не только в исполнительном контуре управления мобильными

роботами, но и для выполнения ряда других значимых для надежной навигации функций, включая обработку сенсорной информации, формирование моделей внешней среды, идентификацию проблемных ситуаций, требующих принятия решений, а также поддержку коммуникации с ЧО.

В этом случае система локальной навигации может быть построена таким образом, что автономный робот может (с помощью системы датчиков и сенсоров для сбора данных из окружающей среды) самостоятельно оценивать окружающую обстановку и планировать свой путь, а ЧО посредством развитой системы визуализации обеспечивать условия адекватного восприятия текущей сцены для контроля обстановки. Другими словами, отмеченные в литературе достижения высокой степени автономности роботов являются следствием комплексных решений на основе применения технологий ИИ, искусственных нейросетей (ИНС) для выполнения локальной навигации, разведки и картографирования в режиме реального времени. При ведении ЧО пространственной ориентировки играет важную роль индикация так называемой горизонтальной обстановки на многослойной цифровой электронной карте местности (ЦЭКМ) с разметкой опорных точек движения ЛР по маршруту и навигационных «ориентиров-маяков» [13].

Для сравнения возможных вариантов навигации в слабоструктурированной среде обратимся к нескольким источникам на обсуждаемую тему, которые непосредственно адресованы проблеме роботизированного освоения Луны.

Одна из первых таких работ опубликована в 1995 г. [14]. В этой работе отмечается, что вопрос навигации является критически важным для успеха любой миссии лунохода и для решения этого вопроса исследуются комбинированные методы управления, которые объединяют преимущества участия в управлении ровером и человека, и автомата. Авторы исследуют применяемые для навигации и позиционирования лунохода методы стереозрения, локального обхода препятствий, оценки положения и взаимодействия с пользователем. Автономный ЛР в проведенном исследовании использует карты дальности, созданные с помощью стереовидения, и детальную модель местности для оценки проходимости различных путей. Эти оценки сочетаются с рекомендациями от автономной системы для ЧО относительно получения команд угла поворота и скорости, которые одновременно безопасны и отвечают поставленным оператором целям.

Возможный вариант комбинированного управления рассмотрен в работе [15]. В ней авторы проводят сравнение автоматического и ручного управлений, рассматриваемых по отдельности и совместно, и выявляют достоинства и недостатки, присущие каждому из них. В числе преимуществ автоматического способа управления движением ЛР с помощью системы технического зрения (СТЗ) называется возможность точного количественного измерения формы рельефа перед ЛР и возможность построения 3D-сетки поверхности грунта. Человек не всегда может выполнить эту задачу в реальном масштабе времени в условиях недостаточной видимости, поскольку в полярных



областях Луны могут образовываться участки поверхности, которые будут находиться в постоянной тени при любом положении Солнца. Возможные нарушения визуального восприятия характера местности могут иметь и другие причины, например из-за того, что лунный грунт (реголит) имеет специфические светооптические характеристики отражения.

К недостаткам автоматического способа управления движением ЛР при навигации и позиционировании с помощью СТЗ и средств определения удаленности объектов авторы работы [15] относят ограниченные возможности априорной разработки автоматического способа выхода из возникающих на маршруте непредвиденных ситуаций, вероятность которых достаточно высока, и для которых трудно заранее разработать формализованные алгоритмы купирования негативных исходов. Второе ограничение состоит в том, что для ЛР принцип рассмотрения ситуации в ее локальном представлении автоматической системой позиционирования существенно проигрывает принципу глобального видения целей миссии человеком на этапах перемещения по маршруту и построения пути.

Из этих публикаций можно заключить, что категории глобального и локального видения и восприятия ситуации становятся определяющими в вопросах понимания возможностей естественного и искусственного интеллекта, а уровень задействования интеллектуальной возможности оператора – критической характеристикой обеспечения безопасности функционирования такой системы.

Для более полного понимания настоящего этапа внедрения роботизированных комплексов на базе ИИ необходимо обратить внимание на доминирующие тенденции экстремальной робототехники в достижении максимальной степени автономности мобильных роботов. В широком контексте вопросы автономии роботов при взаимодействии с человеком обсуждаются в работах [16–19].

Из зарубежных публикаций на эту тему отметим исследование [20], содержащее вывод о том, что при повышении уровня автономности человеко-машинный интерфейс в меньшей степени используется для ручного управления, а в большей степени для мониторинга внешней обстановки и диагностики технического состояния робота.

Перед тем как рассматривать вопросы применения вычислительных методов для построения дорожной карты с возможными маршрутами перемещения ЛР и формирования визуально-образных представлений о приемлемом для ЧО варианте, необходимо сформулировать исходные методические посылки формирования системы деятельности ЧО при построении сценария разработки дорожной карты и ее семантической разметки.

В числе основных этапов формирования системы деятельности ЧО фигурируют:

– задание ЧО посредством инструктивного предписания предстоящего маршрута, описания начальной и конечной точек, визуальных ориентиров

(маяков), в которых принимаются решения о выборе сложности маршрута из числа имеющихся в наличии;

- освоение ЧО способов визуального опознавания ориентиров;
- получение оператором представления о ресурсных ограничениях по вариантам тактического выбора маршрута;
- получение оператором знаний о потенциальной сложности задачи управления с обходом препятствий в зависимости от характера поверхности и наличия естественных препятствий движению ЛР.

### **1.2. Направления практической реализации подхода к ведению пространственной ориентировки, основанного на визуально-образной навигации**

В литературе по экстремальной робототехнике один из подходов к решению задач навигации мобильных роботов связывают с возможностью визуально-образной навигации, что представляет интерес с точки зрения достижения подобия тем механизмам, которые заимствуются из живой природы. Этот вариант интересен в русле темы обзора тем, что для навигации ЛР, помимо развитых методов локальной визуальной навигации, могут быть использованы перцептивные и когнитивные возможности ЧО. При этом необходимо обращать внимание как на стороны человеко-ориентированного распределения функций, которые повышают надежность контроля работы автоматики по распознаванию и идентификации навигационных ориентиров, так и на те стороны, которые связаны с ограничениями человеческого фактора в отношении функционирования зрительного анализатора ЧО в условиях воздействия внешних факторов.

В работах [21, 22] рассмотрены перспективные методы визуальной навигации мобильного робота, которые сопоставляются с уровнями организации человеко-машинной системы управления мобильного робота. Этот подход дает возможность построения картографических моделей окружающего пространства на единой семантической основе, единого для автомата и ЧО набора объектов, используемых для решения навигационных задач и визуального определения своего местоположения. Авторами цитируемых работ сформулировано положение о том, что реализация и обеспечение автономной навигации мобильного робота требуют представления окружающего пространства, соответствующего навигационному регуляторному образу человека. Этим решением объединяется зрительное и семантическое представление об окружающей среде, что может быть той понятийной основой, которая обеспечивает взаимное информирование ЧО и ЛР в едином контуре определения местоположения и контроля выбора направления перемещения ЛР к ближайшей на карте локальной цели (навигационному маяку).

В развитии данного подхода можно говорить о возможности решения задач локальной навигации на основе построения зрительно-образных и семантических принципов, используя значимые для ведения пространственной



ориентировки объекты, выявляемые СТЗ в реальной среде, и возможности зрительного распознавания ЧО ориентиров внешней среды «от первого лица».

Из известных технологических решений, которые обсуждаются в литературе и частично отражены в данном обзоре выше по тексту, выделим вопрос размещения на поверхности Луны навигационных маяков. Существенно, что выполнение требования безопасности перемещения по лунной поверхности на мобильном транспортном средстве типа ЛР требует введения в рассмотрение специальных визуальных ориентиров – маяков, которые могут быть достаточно легко распознаны человеком и для которых известны размеры и взаимные расстояния в принятой системе координат. В литературных источниках в разных контекстах они обозначаются терминами: визуальные ориентиры, навигационные маяки, топографические ориентиры, роутеры связи и др.

Следуя работам [21, 22], можно выдвинуть требования, связанные с ограничениями человеческого фактора при зрительном распознавании ориентиров в ходе пространственной ориентировки, а именно:

- ориентир должен быть хорошо заметен на фоне окружающих объектов, легко идентифицирован и распознан в контексте очередного этапа перемещения по маршруту;
- должна быть обеспечена хорошая наблюдаемость (видимость) ориентира в разных ракурсах и с разных точек маршрута;
- для оперативного решения триангуляционных задач ориентиры должны быть пространственно-компактными.

Таким образом, из цитируемых работ вытекает следствие о том, что формирование визуальных естественных ориентиров и локализации робота в пространстве этих ориентиров дает основание использования цифровых электронных карт местности в форме многослойных карт, на которых дополнительно к традиционной 2D-разметке дорожной карты размещаются маяки с навигационной информацией, что дает основания для прогнозирования возможных рисков возникновения проблемных ситуаций из-за снижения точности позиционирования ЛР.

### **1.3. Возможности графоаналитических методов построения дорожной карты и составление спецификаций маршрута ЛР**

Прологом к освоению районов Луны являются масштабные проекты составления ЦЭКМ для последующей навигации и позиционирования роботов и искусственных сооружений, методов обнаружения искусственных объектов на лунной поверхности, способов размещения специальных маяков («роутеров связи») в опорных точках навигации, которые позволяют в оперативном режиме устанавливать местонахождение объектов с помощью бортовых средств ЛР для их обнаружения, распознавания и идентификации. На этапе предварительного планирования миссии ЛР необходимо выбрать

вариант информационной поддержки оператора. Формирование у космонавтов навигационного образа предстоящей миссии возможно с применением компьютерных средств, позволяющих выбрать на цифровой карте район, включающий начальную и конечную целевую точку перемещения ЛР, преобразовать данные карты в визуальное представление препятствий движению с разметкой высот и расположения маяков в опорных точках маршрута, построить карту проходимости, наметить возможные маршруты и оценить требуемые ресурсы.

Это позволит человеку на этапе предварительной подготовки транспортной операции выполнить анализ и сделать априорный выбор маршрутов, которые наиболее безопасны и отвечают заданным ограничениям по наличным ресурсам, а в самом процессе движения вести оперативный контроль объектов возможных коллизий и отклонения от предписанного маршрута по результатам автоматического управления. Фактически это означает контроль работы бортового оборудования, отвечающего за прокладку и выдерживание маршрута в масштабе реального времени.

В работе [23] с позиций онтологического подхода к исследованию вопроса взаимодействия человека и ЛР с учетом опосредованного технологиями виртуальной реальности способа ведения пространственной ориентировки выделены следующие ключевые вопросы:

- как обеспечить ведение ориентировки по результатам восприятия внешней обстановки ЧО и на основе выполнения измерений бортовыми системами ЛР (и какие технологии локальной навигации, устройства, датчики и сенсоры для этого нужны);

- обнаружить и распознать объект на расстоянии с помощью бортовых устройств робота (дальномеров и систем технического зрения) и обеспечить подобие механизмов зрительного восприятия среды человеком и способов визуальной навигации ЛР;

- средствами наблюдения в составе ЛР обеспечить индикацию визуальной картины для владения ЧО ситуацией в плане ведения пространственной ориентировки и контроля правильности прохождения предписанного маршрута;

- средствами накопления, ведения, реструктуризации изображения знаний обеспечить ЧО актуализацию механизмов поиска решений в проблемной ситуации на маршруте перемещения ЛР.

Перед тем как рассмотреть вопросы вычислительного характера, целесообразно сделать пояснение дальнейшей направленности литературного обзора.

Подавляющее число публикаций на тему применения различных методов построения пути и маршрутизации, включая методы вычислений на графах, написаны с позиций специалистов в области информатики, математики и географии с акцентом на вопросы обоснования корректности постановки математической задачи, выбора методов и алгоритмов математических

расчетов, готовых или вновь разрабатываемых сред вычислений, подходящих библиотек программ и пр.

По данному направлению обзоры последнего времени представлены в работах [24–28].

Применительно к задачам построения пути мобильного робота на поверхности Луны удастся найти отдельные работы для автономных наплетных роботов конкретных конструкций и под конкретные целевые задачи лунной миссии [29–32].

Для конечного пользователя, в данном случае оператора лунохода, наибольшую ценность представляют задачи структурирования знаний инструментальными средствами для понимания следующих процедур и механизмов:

1) каким образом надо строить набор слоев карты, чтобы обеспечивалась их семантическая совместимость, а в своей совокупности они давали исчерпывающий состав информации о трудностях прохождения пути и рисков на конкретных локациях;

2) как соотносятся объекты многослойной ГИС-карты;

3) каким образом ЦЭКМ могут последовательно уточняться и модифицироваться, какие факторы на это влияют (улучшение точности орбитальной съемки, применение мобильных роботов-разведчиков и др.);

4) в каком объеме карты конкретных локаций могут быть уточнены в ходе эксплуатации ЛР с применением вариантов технологий одновременной разведки и картографирования (англ.: SLIM)<sup>1</sup>.

Дальнейший анализ направлен на поиск аналогов для системы информационного обеспечения интеллектуальной деятельности космонавта с включением вычислительного инструментария, с помощью которого космонавт может найти и визуализировать приемлемые решения в области маршрутизации района поверхности Луны.

Мотивация разработки вычислительных методов построения пути автономного мобильного робота обычно возникает при выявленных ограничениях и недостатках (прежде всего, по точности локализации) существующей инфраструктуры навигационного обеспечения, что также ожидается на начальных этапах освоения Луны. До настоящего времени нет единой точки зрения на выбор концепции построения глобальной лунной навигации, несмотря на большой массив литературы по данному вопросу, что отмечалось выше в настоящем обзоре. Применительно к ЛР до настоящего времени нет также общепринятой точки зрения на выбор технологий глобальной и локальной навигации.

Помимо внешних инфраструктурных факторов, поиск рационального маршрута перемещения мобильного транспортного средства в слабо-

---

<sup>1</sup> SLAM (англ. *simultaneous localization and mapping* – одновременная локализация и построение карты) – метод, используемый в мобильных автономных средствах для построения карты в неизвестном пространстве или для обновления карты в заранее известном пространстве с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути.

структурированной внешней среде является сложной задачей экстремальной робототехники, требующей учета большого числа исходных данных об используемом техническом средстве, о районе перемещения, задаваемых пользователем критериях оптимальности, а также учета требований к визуальному отображению для ЧО результатов маршрутизации района перемещения ЛР.

Сложность этой задачи и необходимость сравнительного анализа вытекает из высокой неопределенности практически по всем видам исходных данных. В число неопределенных и нечетких данных могут входить: параметры проходимости местности, технические возможности транспортного средства по преодолению препятствий, характер грунта, точность топографической карты, точность приборов локализации и др.

Среди первоисточников, в которых наиболее отчетливо проводится идея интерактивного подхода к принятию решения об оптимальности выбора маршрута при наличии конкурирующих критериев, в качестве прототипа может быть рассмотрена работа [26], в которой обсуждается методология работы с данными цифровой карты и со структурами графового представления пути. В цитируемой работе предложены приемы планирования маршрута в статической среде, с помощью которых могут быть структурированы знания о глобальной цели оптимизации с помощью вычислительных методов маршрутизации на графах. Авторы развивают подходы известные из области построения графов вокруг препятствий на известной карте. В рамках рассматриваемой методологии используется граф специального вида, который носит название дорожной карты, на основе обзора существующих методов построения дорожной карты, в частности, даются ссылки на метод графа видимости (Visibility Graph), метод графа касательных (Tangent Graph) и алгоритм A\*, алгоритм Дейкстры и ряд других. Для проведения собственных расчетов в работе [26] применен метод диаграммы Вороного, при этом основное внимание уделено глобальному алгоритму маршрутизации.

Заслуживающий внимания прием, также предложенный в этой работе, состоит в нанесении на исходную карту экспертно заданных виртуальных объектов, которые авторы называют критическими точками опасности и точками роутера. При появлении на карте критических точек опасности, алгоритмы учитывают их как блокирующие маршрут препятствия, через которые не должны проходить пути. Второй тип виртуальных точек нужен в случае, когда в начальной или какой-то промежуточной позиции у робота должна быть связь с устройством контроля, которым авторы дали название роутер связи, помогающим в планировании пути, и требуется выбрать маршрут как можно длительней поддерживающий эту связь. Такими виртуальными объектами могут быть маркированы локации расположения радиомаяков или лазерных излучателей для локальной навигации.

Более общим типом виртуальных объектов для разметки дорожной карты могут быть:

- различные маяки-указатели направления дальнейшего перемещения ЛР;
- расстояние до ближайшей контрольной точки, в которой меняется курс;
- визуальные признаки ближайшего ориентира и др.

Наиболее часто используемые условия для сравнительного анализа рассчитанных маршрутов представлены показателями:

- *время прохождения маршрута*, если необходимо пройти маршрут наиболее быстрым образом;
- *длина пути*, когда речь идет об экономном расходовании ресурсов;
- *максимальное (или среднее) удаление от препятствий* по мере прохождения маршрута (во время движения сохранять дистанцию до препятствий).

Значительная часть такой аналитической работы может быть алгоритмизирована и запрограммирована в виде стандартных расчетных процедур.

#### **1.4. Предлагаемый способ построения дорожной карты и моделирования перемещений ЛР в неразведанной местности на основе метода потенциалов**

Как отмечалось выше, существенную роль при планировании применения ЛР занимает вопрос построения пути. Обычно задача формулируется как нахождение траектории из начальной точки нахождения робота к заданному, заранее известному месту. Выделяют два типа задач планирования пути: 1) робот имеет полную информацию об окружающей среде; 2) робот обладает неполной информацией. В настоящей работе рассматривается задача обхода препятствий роботом, имеющим неполную информацию об окружающей среде. В качестве базового алгоритма был использован метод потенциалных полей, который относится к классическим методам построения траектории движения робота из перечисленных выше работ [24–26, 28, 32].

##### **1.4.1. Выбор метода моделирования для нахождения траектории**

Для апробации сформулированного подхода выбран метод моделирования поля потенциалов, который состоит в следующем.

Основной характеристикой метода потенциалов является задание потенциального поля  $U(x)$ :

$$U(x) = U_{\text{attract}}(x) + U_{\text{repulse}}(x),$$

где  $U_{\text{attract}}(x)$  – потенциальное поле, созданное целевой точкой;

$U_{\text{repulse}}(x)$  – потенциальное поле, созданное препятствиями.

Выбор функций  $U_{\text{attract}}(x)$ ,  $U_{\text{repulse}}(x)$  определяет вид траекторий.

Для нахождения траектории, соединяющей начальную и целевую точки, необходимо двигаться в направлении убывания потенциала. Реализовать такое движение можно методом градиентного спуска, когда обеспечивается перемещение вдоль градиента.

Пример градиента потенциального поля приведен на рис. 1.

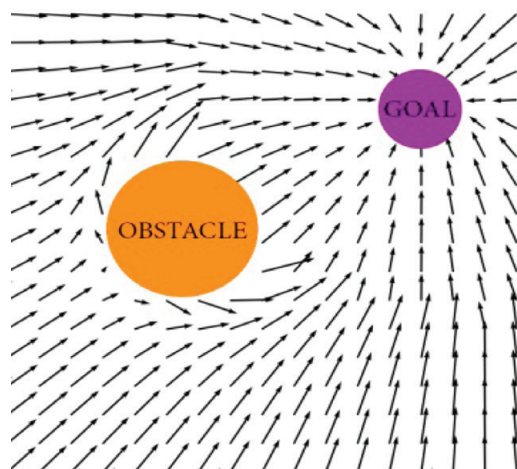


Рис. 1. Градиент потенциального поля

В работе были выбраны следующие функции  $U_{attract}(x)$  и  $U_{repulse}(x)$ :

$$U_{attract}(x) = \frac{D(x_{goal}, x)}{D(x_{goal}, x_{start})},$$

$$U_{repulse}(x) = e^{-\beta D(x_{obstacle}, x)},$$

где  $x_{goal}$ ,  $x_{start}$  – координаты начальной и конечной точек;

$x_{goal}$  – координата ближайшей точки препятствия к  $x$ ;

$D(x_1, x_2)$  – расстояние между точками  $x_1$  и  $x_2$ ;

$\beta$  – параметр определяет, на каком расстоянии робот начинает объезжать препятствие.

#### 1.4.2. Моделирование движения мобильного робота в неразведанной местности

Для первоначальной оценки применимости метода робот был смоделирован движущейся точкой с координатой  $x_{robot}$ , имеющий направление  $\theta_{robot}$  и форму окружности радиуса  $R_{robot}$ .

Уравнение движения робота:

$$x_{robot} \dot{} = -k_{grad} U(x_{robot}),$$

где  $k$  – характеризует величину шага вдоль спуска.

Робот оснащен вращающимся лазерным дальномером с зоной действия дальномера:

$$R_{rf\_max} > R_{robot}.$$



Предполагается, что дальномер мгновенно совершает полный оборот, получая карту расстояний до окружающих препятствий. Полученные расстояния скорректированы на размер робота.

На рис. 2 изображена модель такого робота. Круг отображает зону действия дальномера, в центре круга находится робот, маркерами на препятствии обозначены замеченные роботом точки препятствия, а линия, идущая из центра робота, – перемещение центра робота.

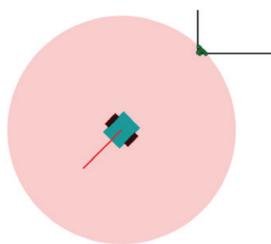


Рис. 2. Модель перемещения робота в среде с неполной информацией

Введем еще одну предпосылку на модули скорости препятствий ограничения:

$$|V_{robot}| < |V_{obstacle}|,$$

где  $V_{robot}, V_{obstacle}$  – вектора скоростей робота и препятствия соответственно.

В рамках вышеизложенной модели проведено моделирование движения робота из нижнего левого угла карты в правый верхний угол это движение последовательно изображено на рис. 3а – 3д. Карта местности состоит из двух круглых препятствий левое препятствие стационарное, правое – движется с небольшой постоянной скоростью. Вначале робот совершает объезд на минимально допустимом расстоянии до стационарного препятствия (рис. 3б) до встречи с подвижным препятствием (рис. 3в). При достижении максимально допустимого расстояния робот совершает разворот и начинает движение от препятствия рис. 3в, когда расстояние между роботом и подвижным препятствием становится допустимым расстоянием, робот совершает разворот (рис. 3г) и продолжает движение к целевой точке (рис. 3д).

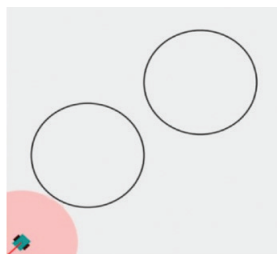


Рис. 3а. Начало пути

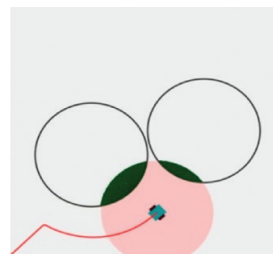


Рис. 3б. Объезд стационарного препятствия

Из рис. 3г видно, что для движения между двух препятствий требуется несколько большее расстояние до каждого препятствия. Для обеспечения большей проходимости робота было решено менять значение коэффициента  $\beta$  в зависимости от расположения препятствия относительно робота. Предлагается задать наименьшее значение  $\beta$  в передней зоне, а затем постепенно его увеличивать, и в задней зоне  $\beta$  должно будет получить максимальное значение. Задание коэффициента  $\beta$  обеспечит большую проходимость робота без существенного увеличения риска столкновения. Результаты изменения  $\beta$  представлены на рис. 3е.

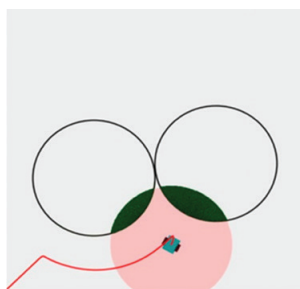


Рис. 3в. Уход от подвижного препятствия

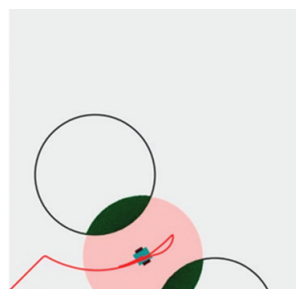


Рис. 3г. Разворот и продолжение пути к цели

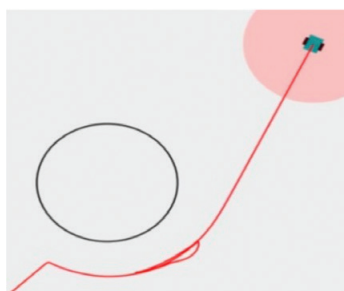


Рис. 3д. Достижение целевой точки

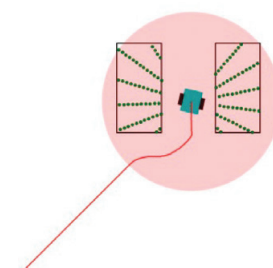


Рис. 3е. Проезд между препятствиями при изменении коэффициента

### 1.5. Перспективные направления создания имитационно-моделирующей системы для построения дорожной карты и отработки спецификаций маршрутов ЛР

При создании имитационно-моделирующей системы для разработки маршрутов ЛР необходимо обратиться к вопросу, каким образом ранее отработанные приемы моделирования операторской деятельности космонавта могут быть дополнены контурами поддержки глобальной и локальной навигации. Фактически речь идет о системе индикации, в которой должны быть интегрированы вышерассмотренные приемы работы ЧО с разнотипными данными ГИС-карты. Для этого может понадобиться способ многоканального

отображения информации, при котором на разных мониторах отображается наблюдаемая ЧО «вертикальная» и «горизонтальная» обстановка в ходе перемещения ЛР по маршруту, в том числе отдельные каналы могут быть зарезервированы под контент дорожной карты и выдачу предупредительной информации от системы ИИ ЛР.

Входными данными для построения маршрута могут быть начальная и конечная точки и некоторое число промежуточных точек маршрута, которые определены разметкой маршрута по предписаниям пользователя. Их можно задавать координатами в некоторой единой системе координат и отмечать на электронной карте специальными символами – знаками. Критерий подходящего маршрута, проходящего через эти реперные точки, должен обеспечивать безопасность проезда ЛР по маршруту (дополнительно к ранее перечисленным критериям сюда относятся отсутствие больших трещин, крутых спусков, сыпучих грунтов и др.), энергетическую эффективность и др.

Ниже на рис. 4, 5 представлены возможные варианты разметки маршрутов с пояснениями, какую полезную информацию ЧО может получить в оперативном режиме контроля правильности прохождения пути и точности выхода на визуальные ориентиры

На рис. 4 показаны два маршрута с разным числом потенциально опасных естественных образований, но при этом топография их расположения такова, что более безопасным может расцениваться маршрут, требующий меньшего числа маневров (поворотов) при объезде.

На рис. 5 показан предлагаемый состав навигационной информации для контроля точности позиционирования ЛР.



Рис. 4. Состав информационного кадра – фрагмент маршрута на дорожной карте для определения позиционирования ЛР

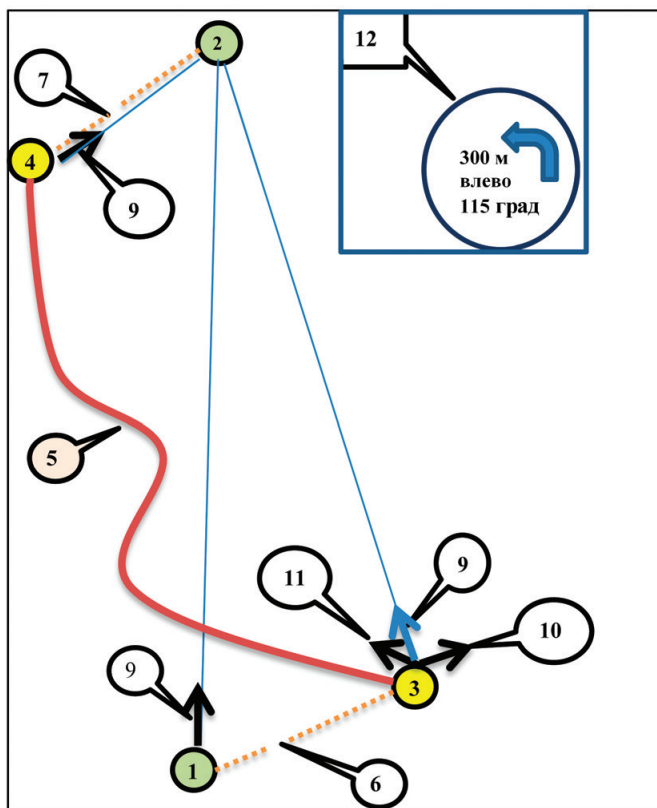


Рис. 5. Состав навигационной информации для контроля точности позиционирования ЛР:

1 – начальная точка маршрута; 2 – конечная точка маршрута; 3 – текущий навигационный маяк после пройденного отрезка пути; 4 – очередной навигационный маяк с навигационными параметрами и вид маневра; 5 – предстоящий маршрут; 6 – пройденная часть маршрута; 7 – предстоящая часть маршрута; 8 – направление вектора на конечную точку маршрута из текущей точки; 9 – прежнее направление движения; 10 – новое направление движения; 11 – формат команды для контроля навигации: дальность, вид поворота – (вид обхода), угол поворота

Задача построения такого маршрута с дополнительными критериями сложности прохождения для технических характеристик ЛР может потребовать разработки оригинальной компьютерной программы, предназначенной для визуализации ЧО возможных помех на топографической 2D-карте Луны, на которой можно определить высоты всех точек и наклоны линий перепада высот. Кроме того, такая входная информация может потребовать пересмотра результатов расчета и ранее выбранного маршрута, опираясь на новую конфигурацию областей, ограничивающих перемещение ЛР.

Наибольший положительный эффект может дать использование подробной 3D-модели рассматриваемого участка лунной поверхности и дина-

мической 3D-модели ЛР для имитационного моделирования перемещения по предустановленному маршруту под зрительным контролем со стороны ЧО. При этом в плане расширения функциональных возможностей интерактивных расчетов, возможно, придется вводить ряд дополнительных ограничений и условий, в частности, предусмотреть возможность моделировать светотеневую обстановку, характеристики грунта и другие критически важные для точности локализации особенности.

Необходимо также моделировать функционирование и показания соответствующих бортовых приборов и систем ЛР, которые обеспечивают одновременную разведку и построение уточненной цифровой карты. Возможно также визуальное сравнение видимого ландшафта из текущей позиции ЛР и виртуального 3D-ландшафта Луны из той же позиции.

Результатом всех этих работ в конечном итоге ожидается проектирование и прокладка сети дорог на критически важных участках лунной поверхности с высокой достоверностью локализации потенциальных угроз безопасности.

## **Выводы**

1. Локализация и планирование пути являются важнейшими компонентами навигации мобильных роботов. При этом поиск рационального маршрута перемещения мобильного транспортного средства в слабоструктурированной внешней среде является сложной задачей экстремальной робототехники, требующей учета множества исходных данных о самом техническом средстве, районе перемещения, критериях оптимальности, требованиях к конечному визуальному отображению результатов, отвечающих принципам экономичности и легкости восприятия для ЧО.

2. Мотивация разработки численных методов для планирования пути автономного мобильного робота связана с ограничениями и недостатками существующей инфраструктуры навигационного обеспечения, которые предвидятся на начальных этапах роботизированного освоения Луны. До настоящего времени нет единой точки зрения на выбор концепции построения глобальной лунной навигации, несмотря на большой массив литературы по данному вопросу.

3. Для построения дорожной карты возможно использование вычислительных алгоритмов на базе графоаналитических моделей и ранжирование экспертом предпочтительных маршрутов лунохода, включающих описание характерных ориентиров (визуально распознаваемых маяков) и задание атрибутов отрезков маршрута (протяженность, наличие препятствий, близость опасных природных образований, условия освещенности и т. д.).

4. В настоящем исследовании представлен алгоритм выполнения расчетов для построения пути. Задача формулируется как нахождение траектории из начальной точки перемещения робота к заданному, заранее известному месту с неполной информацией. Решено было использовать метод

потенциальных полей, который относится к классическим методам построения траектории движения робота. Алгоритмизованный метод потенциальных полей можно интерпретировать как движение робота в поле сил, где целевая точка притягивает робота, тогда как препятствия отталкивают.

5. Представление знаний, полученных методами интерактивных расчетов для построения дорожной карты и выбора предпочтительного маршрута, может осуществляться в форме построения дорожных карт на принципах ГИС-систем. Их использование создает благоприятные предпосылки для воспроизведения знаний космонавтов о способах распознавания проблемных ситуаций и выбора варианта действий посредством актуализации интеллектуальной деятельности человека в оперативном режиме контроля перемещения лунохода по предписанному маршруту.

6. В настоящее время правомерен такой подход к планированию маршрута, который позволяет последовательно строить предварительный маршрут перемещения, а затем его корректировать в зависимости от уточняющих данных. Для повышения качества моделирования маршрутов дорожной карты для лунохода необходимы дополнительные уточнения исходных данных: параметров проходимости местности, технических возможностей преодоления препятствий, характера грунта, точности топографической карты, точности приборов локализации и навигации, мест размещения оборудования, которое надлежит доставить с помощью робота, запасов ресурсного обеспечения (как носимого с собой операторами, так и размещаемого в местах складирования и др.).

7. В результате выполненного анализа существующих подходов и вычислительных методов для построения дорожной карты для транспортного средства и ее экспертно-обусловленной семантической разметки с помощью визуально опознаваемых ориентиров в настоящей работе выделены перспективные направления системы поддержки интеллектуальной деятельности космонавтов при выполнении операций построения и контроля правильности прохождения маршрута в слабоструктурированной среде на поверхности Луны. Предложен алгоритм построения дорожной карты с выбором маневров обхода препятствий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Исследование качества работы космонавтов при моделировании условий ВКД на поверхности Марса в экспериментах с участием экипажей МКС / Б.И. Крючков, М.М. Харламов, П.П. Долгов, В.М. Усов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – № 3(40). – С. 43–60.
- [2] Метод моделирования операций внекорабельной деятельности на поверхности луны с учетом воздействия гипогравитации / В.И. Гушин, Р.Х. Абдюханов, А.И. Нетреба, Е.С. Томиловская [и др.] // Космическая техника и технологии. – 2023. – № 2(41). – С. 5–23.
- [3] LunarNav: Crater-based Localization for Long-range Autonomous Lunar Rover Navigation / S. Daftry, Z. Chen, Y. Cheng, S. Tepsuporn [et al.] // In: 2023



- IEEE Aerospace Conference, 2023. – P. 1–15. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.01350> (accessed 18.04.2024).
- [4] Lunar Rover Localization Using Craters as Landmarks / L. Matthies, S. Tepsuporn, Y. Cheng, S. Daftry [et al.] – DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843714 // In: 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO), Big Sky, MT, USA, 2022. – P. 1–17.
- [5] Deployment Method and Optimal Placement of Surface Beacon Navigation System for Co-Located Lunar Landings / C. Toldbo, A. Kiss, N. Törjék, C.A.T. Vázquez [et al.] // *Acta Astronautica*. – 2022. – Vol. 193. – P. 432–443. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.01.003> (accessed 18.04.2024).
- [6] Optimizing the Beacon Positions on the Lunar Surface in a Radio Navigation System / E.V. Akimov, S.Yu. Bakharev, D.A. Kozorez, D.M. Kruzhkov // *Russian Engineering Research*. – 2021. – Vol. 41. – P. 759–761.
- [7] Мелехин, В.Б. Принцип организации мотивационного поведения и автоматического целеполагания автономных интеллектуальных мобильных систем / В.Б. Мелехин, М.В. Хачумов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2023. – № 24(2). – С. 75–84.
- [8] Романов, П.С. Подходы к созданию интеллектуальной системы управления мобильным роботом / П.С. Романов, И.П. Романова. – Текст: электронный // *Инженерный Вестник Дона: электронный научный журнал*. – 2018. – № 1(48). – С. 1–13. – URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_80\\_romanov.pdf\\_1ed870ce12.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_80_romanov.pdf_1ed870ce12.pdf) (дата обращения 18.04.2024).
- [9] Мелехин, В.Б. Планирование многоэтапной деятельности интеллектуальным роботом в условиях неопределенности. / В.Б. Мелехин, М.В. Хачумов // *Автоматика и Телемеханика*. – 2023. – № 12. – С. 146–168.
- [10] Михайлов, Б.Б. Автономные мобильные роботы – навигация и управление / Б.Б. Михайлов, А.В. Назарова, А.С. Ющенко // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2016. – № 2(175). – С. 48–67.
- [11] Ющенко, А.С. Маршрутизация движения мобильного робота в условиях неопределенности // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2004. – № 1. – С. 31–38.
- [12] Ющенко, А.С. Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи. *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2017. – № 18(12). – С. 812–819.
- [13] Валаа, О. Исследование системы навигации для мобильных роботов на основе одновременной локализации и построения карты / О. Валаа, В.С. Громов. – DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-371-376 // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 371–376.
- [14] Mixed-Mode Control of Navigation for a Lunar Rover / R. Simmons, E. Krotkov, L. Chrisman, F. Cozman [et al.] // *Princeton Space Manufacturing Conference, 1995: Proceedings of 12th SSI*. – 1995. – P. 209–215.
- [15] Общая методология совместного применения операторного и автоматического управления движением лунохода в «ночных» кратерах на полюсах Луны / С.П. Буслаев, В.А. Воронцов, О.С. Графодатский, А.М. Крайнов. – Текст: электронный // *Инженерный журнал: наука и инновации: электронный научный журнал*. – 2017. – № 8(68). – С. 184–185. – URL: <https://engjournal.ru/catalog/pmce/hmhu/1665.html/>. – Дата публикации: 03.07.2017.
- [16] Beer, J.M. Toward a Framework for Levels of Robot Autonomy in Human-Robot Interaction / J.M. Beer, A.D. Fisk, W.A. Rogers. – DOI: 10.5898/JHRI.3.2.Beer // *Journal of Human-Robot Interaction*. – 2014. – No 3. – P. 74–99.

- [17] Ермолов, И.Л. О факторах, влияющих на уровень автономности в пространстве транспортных шасси наземных мобильных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 1(174). – С. 210–219.
- [18] Спасский, Б.А. Совместное управление роботами, автономное и от человека-оператора // Робототехника и техническая кибернетика. – 2017. – № 1(14). – С. 69–75.
- [19] Спасский, Б.А. Обзор современных интерфейсных систем операторов мобильных наземных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 4(13). – С. 21–31.
- [20] Fong, T. Vehicle Teleoperation Interfaces / T. Fong, C. Thorpe // Autonomous Robots. – 2001. – Vol. 11, Iss. 1. – P. 9–18.
- [21] Першина, Ж.С. Методы визуальной навигации мобильного робота и построения картографических моделей внешней среды / Ж.С. Першина, С.Я. Каздорф, А.В. Лопота. – DOI: 10.15372/AUT20190210 // Автометрия. – 2019. – Т. 55, № 2. – С. 92–102.
- [22] Половко, С.А. Качественное управление мобильными роботами / С.А. Половко, Е.Ю. Смирнова, Е.И. Юревич // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 3(4). – С. 30–33.
- [23] Взаимодействие человека и робота в пилотируемом космическом полете: онтологический подход / А.А. Карпов, С.Ф. Сергеев, О.И. Лахин, М.В. Михайлюк [и др.]. – DOI 10.34131/MSF.19.4.70-91 // Пилотируемые полеты в космос. – 2019. – № 4(33). – С. 70–91.
- [24] Лю, В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) / В. Лю. – DOI:10.24108/mathm.0118.0000098 // Математика и математическое моделирование. – 2018. – № 1. – С. 15–58.
- [25] Казаков, К.А. Обзор современных методов планирования движения / К.А. Казаков, В.А. Семенов // Труды ИСП РАН. – Москва, 2016. – Т. 28, № 4. – С. 241–294.
- [26] Лавренов, Р.О. Планирование маршрута для беспилотного наземного робота с учетом множества критериев оптимизации / Р.О. Лавренов, И.М. Афанасьев, Е.А. Магид // Третий Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (BTS-II-2016, 22–23 сентября 2016 г., Иннополис, Республика Татарстан, Россия): Труды семинара. – 2016. – С. 10–20.
- [27] Головин, В.А. Примитивы движения робота в задаче планирования траектории с кинематическими ограничениями / В.А. Головин, К.С. Яковлев. – DOI:10.15622/ia.22.6.4 // Информатика и автоматизация. – 2023. – С. 1354–1386.
- [28] Path Planning Approaches for Mobile Robot Navigation in Various Environments: A Review / A. Sanyal, Mohd N. Zafar, J.C. Mohanta, Md. Faiyaz Ahmed. – DOI:10.1007/978-981-15-9956-9\_55 // In book: Advances in Interdisciplinary Engineering, 2021. – P. 555–572.
- [29] Zhang, J. A Novel Learning-based Global Path Planning Algorithm for Planetary Rovers / J. Zhang, Yu. Xia, G. Shen // ArXiv: [website]. – 2018. – URL: <https://arxiv.org/abs/1811.10437> (accessed 18.04.2024).
- [30] A Navigation Simulation System of Lunar Rover / J. Liu, Y. Wang, C. Zhou, Y. Geng // Conference report: Networking, Sensing and Control, 06–08 April 2008. – Sanya, China, 2008. – P. 556–561. – Text: electronic // IEEE Xplore: [website]. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4525280?arnumber=4525280/>. – Дата публикации: 20.05.2008.

- [31] Gelling, L. Path Planning for Lunar Rovers: A Lunar Surface Path Finding and Obstacle Avoidance Algorithm. – Text: electronic // TUDelft: [website]. – URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A5a6aecdf-d733-4ecc-ad1a-80b9edd4eb46> (accessed 18.04.2024).
- [32] Движение мобильного робота по горизонтальным, наклонным и вертикальным поверхностям при наличии возмущений и подвижных препятствий / В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, Е.А. Семёнов, А.Н. Суханов. – DOI: 10.17587/mau.16.166-173 // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16, № 3. – С. 166–173.

## REFERENCES

- [1] Investigation of the Quality of Cosmonauts' Work in Modeling the Conditions of the VCD on the Surface of Mars in Experiments with the Participation of ISS crews / B.I. Kryuchkov, M.M. Kharlamov, P.P. Dolgov, V.M. Usov [et al.] // Manned Spaceflights. – 2021. – No 3(40). – P. 43–60. – URL: <https://doi.org/10.34131/MSF.21.3.43-60>.
- [2] A Method for Modeling Operations of Extravehicular Activity on the Surface of the Moon Taking into Account the Effects of Hypogravity / V.I. Gushchin, R.H. Abdyukhanov, A.I. Netreba, E.S. Tomilovskaya [et al.] // Kosmicheskaja Tehnika i Tehnologii. – 2023. – No 2(41). – P. 5–23.
- [3] LunarNav: Crater-based Localization for Long-range Autonomous Lunar Rover Navigation / S. Daftry, Z. Chen, Y. Cheng, S. Tepsuporn [et al.] // In: 2023 IEEE Aerospace Conference, 2023. – P. 1–15. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.01350> (accessed 18.04.2024).
- [4] Lunar Rover Localization Using Craters as Landmarks / L. Matthies, S. Tepsuporn, Y. Cheng, S. Daftry [et al.] – DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843714 // In: 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO), Big Sky, MT, USA, 2022. – P. 1–17.
- [5] Deployment Method and Optimal Placement of Surface Beacon Navigation System for Co-Located Lunar Landings / C. Toldbo, A. Kiss, N. Törjék, C.A.T. Vázquez [et al.] // Acta Astronautica. – 2022. – Vol. 193. – P. 432–443. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.01.003> (accessed 18.04.2024).
- [6] Optimizing the Beacon Positions on the Lunar Surface in a Radio Navigation System / E.V. Akimov, S.Yu. Bakharev, D.A. Kozorez, D.M. Kruzhkov // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41. – P. 759–761.
- [7] Melekhin, V.B. Principle of Organization of Motivational Behavior and Automatic Goal Setting of Autonomous Intelligent Mobile Systems / V.B. Melekhin, M.V. Khachumov. – DOI: 10.17587/mau.24.75-84 // Mechatronics, Automation, Control. – 2023. – No 24(2). – P. 75–84.
- [8] Romanov, P.S. Approaches to the Creation of an Intelligent Control System for a Mobile Robot / P.S. Romanov, I.P. Romanova // Engineering Vestnik Don. – 2018. – No 1(48). – P. 1–13. – URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_80\\_romanov.pdf\\_1ed870ce12.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_80_romanov.pdf_1ed870ce12.pdf) (accessed 18.04.2024).
- [9] Melekhin, V.B. Planning of Multistage Activity by an Intelligent Robot Under Uncertainty / V.B. Melekhin, M.V. Khachumov // Automation and Remote Control. – 2023. – No 12. – P. 146–168.
- [10] Mikhailov, B.B. Autonomous Mobile Robots – Navigation and Control / B.B. Mikhailov, A.V. Nazarova, A.S. Yushchenko // Technical Sciences. – 2016. – No 2(175). – P. 48–67.
- [11] Yushchenko, A.S. Mobile robot Motion Routing Under Uncertainty // Mechatronics, Automation, Control. – 2004. – No 1. – P. 31–38.

- [12] Yuschenko, A.S. Collaborative Robotics: State of Art and New Problems // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. – 2017. – No 18(12). – P. 812–819. – URL: <https://doi.org/10.17587/mau.18.812-819>.
- [13] Valaa, O. Research of a Navigation System for Mobile Robots Based on Simultaneous Localization and Map Construction / O. Valaa, V.S. Gromov. – DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-371-376 // *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. – 2020. – Vol. 20. – No 3. – P. 371–376.
- [14] Mixed-Mode Control of Navigation for a Lunar Rover / R. Simmons, E. Krotkov, L. Chrisman, F. Cozman [et al.] // *Princeton Space Manufacturing Conference, 1995: Proceedings of 12th SSI*. – 1995. – P. 209–215.
- [15] General Methodology of the Joint Application of Operator and Automatic Control of the Lunar Rover Motion in “Night” Craters at the Moon Poles / S.P. Buslaev, V.A. Vorontsov, O.S. Grafodatsky, A.M. Krainov // *Engineering Journal: Science and Innovations*. – 2017. – No 8(68). – P. 184–185. – URL: <https://engjournal.ru/catalog/pmce/hmhu/1665.html/>. – Date of Publication: 03.07.2017.
- [16] Beer, J.M. Toward a Framework for Levels of Robot Autonomy in Human-Robot Interaction. / J.M. Beer, A.D. Fisk, W.A. Rogers. – DOI: 10.5898/JHRI.3.2.Beer // *Journal of Human-Robot Interaction*. – 2014. – No 3. – P. 74–99.
- [17] Ermolov, I.L. On the Factors Influencing the Level of Autonomy in the Space of Transport Chassis of Ground-Based Mobile Robots // *Izvestiya SFU. Technical sciences*. – 2016. – No 1(174). – P. 210–219.
- [18] Spassky, B.A. Joint Robot Control, Autonomous and from a Human Operator // *Robotics and Technical Cybernetics*. – 2017. – No 1(14). – P. 69–75.
- [19] Spassky, B.A. Review of Modern Interface Systems of Operators of Mobile Ground Robots // *Robotics and Technical Cybernetics*. – 2016. – No 4 (13). – P. 21–31.
- [20] Fong, T. Vehicle Teleoperation Interfaces / T. Fong, C. Thorpe // *Autonomous Robots*. – 2001. – Vol. 11, Iss. 1. – P. 9–18.
- [21] Pershina, G.S. Method Aposematic Navigation Mobile Robot and Built Cartographic Model in the Vnesnei Among the Aposematic / G.S. Pershina, S.Ja. Kasdorf, A.V. Shovel. – DOI: 10.15372/AUT20190210 // *Autometry*. – 2019. – Vol. 55, No 2. – P. 92–102.
- [22] Polovko, S.A. Qualitative Control of Mobile Robots / S.A. Polovko, E.Yu. Smirnova, E.I. Jurevich // *Robotics and Technical Cybernetics*. – 2014. – No 3(4) – P. 30–33.
- [23] Human-Robot Interaction in a Manned Space Flight: An Ontological Approach / A.A. Karpov, S.F. Sergeev, O.I. Lakhin, M.V. Mikchailyuk [et al.]. – DOI 10.34131/MSF.19.4.70-91 // *Manned Spaceflight*. – 2019. – No 4(33). – P. 70–91.
- [24] Liu, W. Path Planning Methods in an Environment with Obstacles (Review) / W. Liu. – DOI:10.24108/mathm.0118.0000098 // *Mathematics and Mathematical Modeling*. – 2018. – No 1. – P. 15–58.
- [25] Kazakov, K.A. An Overview of Modern Methods for Motion Planning / K.A. Kazakov, V.A. Semenov. – DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(4)-14 // *Proc. ISP RAS*. – Moscow, 2016. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 241–294.
- [26] Lavrenov, R.O. Route Planning for an Unmanned Ground Robot Taking into Account a Variety of Optimization Criteria / R.O. Lavrenov, I.M. Afanasyev, E.A. Magid // *The Third All-Russian Scientific and Practical Seminar “Unmanned Vehicles With Elements of Artificial Intelligence” (BTS-II-2016, 22–23 September 2016, Innopolis, Republic of Tatarstan, Russia): Proceedings of the seminar*. – 2016. – P. 10–20.

- [27] Golovin, V.A. Motion Primitives in the Trajectory Planning Problem with Kinematic Constraints / V.A. Golovin, K. Yakovlev. – DOI:10.15622/ia.22.6.4 // Informatics and Automation. – 2023. – P. 1354–1386.
- [28] Path Planning Approaches for Mobile Robot Navigation in Various Environments: A Review / A. Sanyal, Mohd N. Zafar, J.C. Mohanta, Md. Faiyaz Ahmed. – DOI:10.1007/978-981-15-9956-9\_55 // In book: Advances in Interdisciplinary Engineering, 2021. – P. 555–572.
- [29] Zhang, J. A Novel Learning-based Global Path Planning Algorithm for Planetary Rovers / J. Zhang, Yu. Xia, G. Shen // ArXiv: [website]. – 2018. – URL: <https://arxiv.org/abs/1811.10437> (accessed 18.04.2024).
- [30] A Navigation Simulation System of Lunar Rover / J. Liu, Y. Wang, C. Zhou, Y. Geng // Conference report: Networking, Sensing and Control, 06–08 April 2008. – Sanya, China, 2008. – P. 556–561. – Text: electronic // IEEE Xplore: [website]. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4525280?arnumber=4525280/>. – Date of Publication: 20.05.2008.
- [31] Gelling, L. Path Planning for Lunar rovers: A Lunar Surface path Finding and Obstacle Avoidance Algorithm. – Text: electronic // TUDelft: [website]. – URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A5a6aecdf-d733-4ecc-ad1a-80b9edd4eb46> (accessed 18.04.2024).
- [32] Mobile Robot's Movement on Vertical and Horizontal Surfaces and Slopes in the Conditions of External Disturbances and Existing Moving Objects / V.G. Gradetsky, M.M. Knyazkov, E.A. Semionov, A.N. Sukhanov. – DOI: 10.17587/mau.16.166-173 // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2015. – No 16(3). – P. 166–173.