

Роботизированные самоходные гусеничные машины в добыче полезных ископаемых открыто-подземным способом

В.С. Великанов¹✉, В.А. Овчинникова¹, И.А. Гришин²

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация
✉v.s.velikanov@urfu.ru

Резюме: Проблема увеличения глобального спроса на полезные ископаемые обозначила необходимость модернизации и совершенствования не только методов и технологий их извлечения, но и создания и применения горных машин, обеспечивающих возможность исключения операторов, управляющих этими машинами, из пыльных, шумных и потенциально опасных условий подземных горных работ. Поэтому в последние десятилетия вектор развития научно-исследовательских разработок направлен на создание полностью автономных роботизированных машин для выполнения основных операций технологического цикла добычи полезных ископаемых. Для эффективной работы в условиях подземных горных выработок для роботизированных горных машин необходима бортовая навигационная система, обеспечивающая правильную интерпретацию сведений об окружающем пространстве, получаемую с помощью современных датчиков и позволяющую строить маршрут передвижения, управлять параметрами движения и постоянно отслеживать собственные координаты. Для решения этой проблемы проведены теоретические и экспериментальные исследования, разработаны теоретические положения создания управляющих систем для интеллектуальных роботизированных горных машин (на примере шахтной гусеничной бурильной установки). Рассмотренный в данном исследовании подход по использованию концепции SLAM позволяет оптимизировать траекторию перемещения беспилотной роботизированной гусеничной бурильной установки, построить карту подземного пространства и определить позицию машины на ней.

Ключевые слова: полезные ископаемые, горная машина, гусеничное ходовое оборудование, добыча полезных ископаемых, открыто-подземный способ добычи

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект №FRZU-2023-0008).

Для цитирования: Великанов В.С., Овчинникова В.А., Гришин И.А. Роботизированные самоходные гусеничные машины в добыче полезных ископаемых открыто-подземным способом. *Горная промышленность*. 2023;(2):76–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-76-82>

Robotic self-propelled tracked vehicles in combined mining systems

V.S. Velikanov¹✉, V.A. Ovchinnikova¹, I.A. Grishin²

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
✉v.s.velikanov@urfu.ru

Abstract: The challenges concerned with the increasing global demand for minerals have identified the need to upgrade and enhance not only the mining methods and systems, but also to create and apply mining machines that would ensure that the operators of these machines can be removed from the dusty, noisy and potentially dangerous environments of the underground mines. Therefore in the last decades the vector of research and development has been directed towards creating fully autonomous robotic machines that would perform the basic operations of the process cycle of mining minerals. To effectively operate in underground mines, the robotic mining machines need an on-board navigation system, which enables correct interpretation of environmental data from state-of-the-art sensors, creates traffic routes, controls the motion parameters and constantly monitors its own coordinates. In order to address this challenge, theoretical and experimental research has been carried out and theoretical provisions for designing control systems for smart robotic mining machines have been developed using a track-

mounted underground drilling unit as an example. The SLAM method used in this study optimizes the path of an unmanned robotic track-mounted drill rig, maps the underground space, and determines the actual location of the machine on this map.

Keywords: minerals, mining machine, track-mounted vehicles, mineral mining, combined mining systems

Acknowledgments: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FRZU-2023–0008).

For citation: Velikanov V.S., Ovchinnikova V.A., Grishin I.A. Robotic self-propelled tracked vehicles in combined mining systems. *Russian Mining Industry*. 2023;(2):76–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-76-82>

Введение

Предприятия горнодобывающей отрасли – это поставщики минерального сырья, тесно связанные с предприятиями оборонно-промышленного комплекса, энергетики, обрабатывающей промышленности и других отраслей.

Развитие минерально-сырьевой базы Российской Федерации в значительной степени зависит от добычи стратегически важных полезных ископаемых. К ним относятся прежде всего уголь и металлические руды (железная руда, медь и др.), т. е. полезные ископаемые первой группы, сырьевая база которых при любых прогнозных сценариях развития экономики РФ достаточна для удовлетворения внутренних потребностей и при необходимости обеспечения экспортных поставок. Аналитические отчеты и материалы федеральной службы государственной статистики показывают, что объемы добываемого в РФ угля устойчиво росли в период 2014–2019 гг. В 2020 г. они снизились относительно показателя предыдущего года на 9,6% – до 361,8 млн т, валовая добыча (общее количество добытого угля, включая пустую породу) составила 402,1 млн т. В настоящее время на территории РФ эксплуатируется 108 угольных шахт и 224 разреза, доля открытых работ выросла с 68 до 79%, но вместе с тем половина коксующегося угля (42,3 млн т в 2020 г.) (рис. 1, а) добывается подземным способом, часто в сложных горно-геологических условиях¹.

По выпуску железорудной продукции РФ входит в лидеры мировых производителей, за последнее десятилетие добыча железных руд из недр выросла на 14,9%, добыча велась на 46 месторождениях, причем около 20% добычи сосредоточено на Урале (рис. 1, б)².

РФ располагает крупной сырьевой базой меди и входит в десятку крупнейших производителей ее рудничной продукции. Медь входит в число базовых промышленных металлов. С 2018 г. наблюдается устойчивый рост, что обусловлено началом освоения ряда новых месторождений и их выходом на проектную мощность. В 2020 г. на медь разрабатывалось 48 коренных месторождений, в том числе 40 существенно медных и восемь комплексных медьсодержащих, а также три техногенных месторождения. Рудничное производство меди составило 924,1 тыс. т (рис. 1, в)³.

Стратегическим вызовом, оказывающим значительное влияние на состояние угольной промышленности России, является увеличение импортозависимости от иностранного оборудования [1; 2]. Аналитические данные по введен-

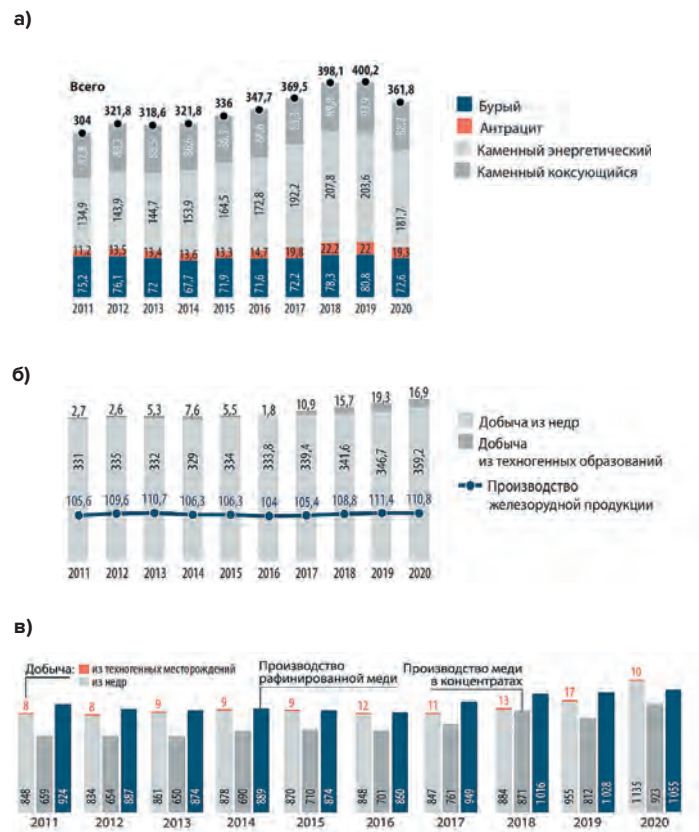


Рис. 1
Динамика добычи угля и металлических руд в 2011–2020 гг.:
а – объем добычи углей, млн т;
б – объем добычи железных руд и производства железорудной продукции, млн т;
в – динамика добычи меди, производства меди в концентратах и рафинированной меди (включая вторичный металл), тыс. т

Fig. 1
Dynamics of coal and metal ore production in 2011–2020:
a – coal mining, mln tonnes;
b – iron ore mining and iron ore products, mln tonnes;
v – dynamics of copper mining, copper concentrate and refined copper production (including secondary metal), thousand tonnes

ному в эксплуатацию на горнодобывающих предприятиях горному оборудованию для подземной добычи угля за период 2017–2022 гг. представлены на рис. 2, а и по открытым горным работам – на рис. 2, б.

Как отмечается в работе [1], на основе анализа закупок приобретаемого угледобывающими компаниями оборудования до 24.02.2022 г. и по настоящий момент основной упор в закупках предприятий направлен на импортное

¹ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году», подготовлен ФГБУ «ВИМС». М.; 2021. 572 с.

² Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году», подготовлен ФГБУ «ВИМС». М.; 2021. 572 с.

³ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году», подготовлен ФГБУ «ВИМС». М.; 2021. 572 с.

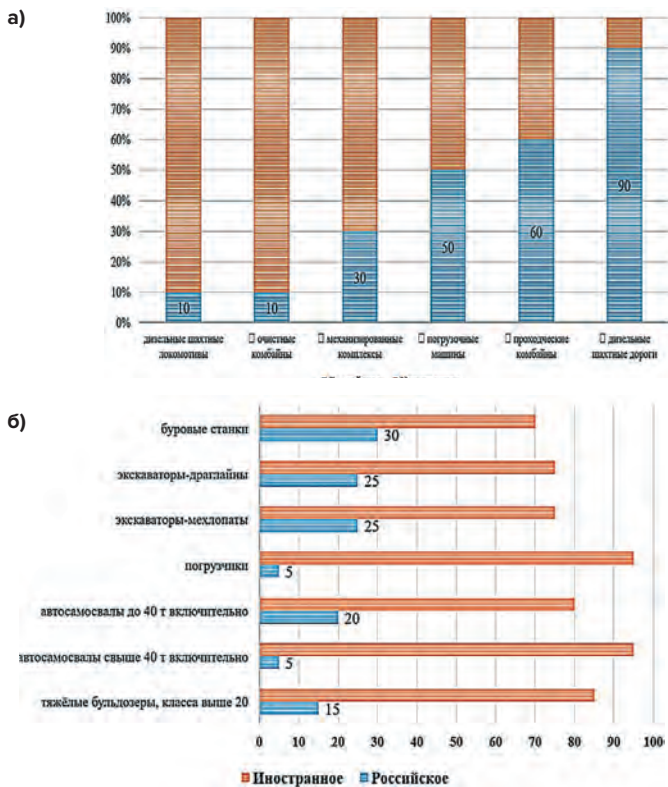


Рис. 2 Введенное в эксплуатацию на горнодобывающих предприятиях горное оборудование для добычи угля за 2017–2022 гг.

Fig. 2 Coal mining equipment commissioned at mining operations in 2017-2022

оборудование, которое зачастую превосходит по техническим и эксплуатационным характеристикам российские аналоги при их наличии. Предусмотренные целевыми индикаторами реализации проекта «Стратегии развития тяжелого машиностроения на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 года» в части снижения доли импортной продукции тяжелого машиностроения на внутреннем рынке до 27,9% и достижения уровня локализации производства на совместных предприятиях до 75% (задачи, цели?) достигнуты не были.

Вместе с тем необходимо отметить следующее немаловажное обстоятельство – дальнейшее освоение запасов полезных ископаемых открытым способом ведется глубокими карьерами с текущей глубиной 300–500 м и более, проектные глубины карьеров могут достигать 700–900 м. Для многих горных предприятий рассматривается перспектива перехода на открыто-подземный (комбинированный) способ разработки. Добыча полезного ископаемого на крупных месторождениях осуществляется несколько десятилетий, что в условиях изменчивости внешней и внутренней среды не позволяет принимать оптимальные решения по основным параметрам горнотехнической системы и технологического оборудования на весь период и полную глубину разработки [3]. Ухудшение горнотехнических, экономических и экологических условий разработки месторождений при высокой интенсивности развития горных работ определяет необходимость модернизации стратегии развития горнотехнической системы путем изменения не только параметров открытых горных работ и перехода на комбинированный способ, но и создания

и внедрения роботизированных высокопроизводительных современных отечественных горных машин, а именно буровых и транспортных.

Переходный процесс при комбинированном способе заключается в смене одного стабильного состояния – открытые горные работы, к другой стадии развития – подземной разработке месторождения (рис. 3) [4]. При этом техническое перевооружение горного предприятия на современном этапе развития комбинированной геотехнологии определяется расширением области внедрения роботизированных горных машин, не предполагающих присутствие человека-оператора в местах ведения горных работ и исключая влияние человеческого фактора на эффективность работ технологического процесса, а целевой функцией применения автономного интеллектуального роботизированного оборудования (рис. 4) [5] выступают полнота и комплексность освоения недр.

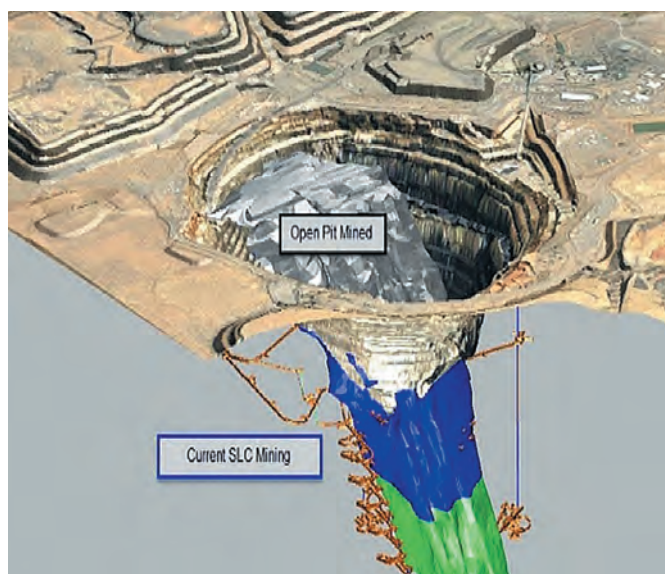


Рис. 3 Открыто-подземный способ добычи полезных ископаемых. Перспективный вид наземных и подземных работ на Ernest Henry Mine [4]

Fig. 3 A combined mining system. A prospective form of surface and underground mining at Ernest Henry Mine [4]



Рис. 4 Мобильный ПТК МРК-27Х [5]

Fig. 4 The MRK-27X Mobile Robotic System [5]

Материалы и методы

Известно, что напряженная и монотонная работа приводит к утомлению, ошибкам и в итоге – к авариям на производстве [6; 7]. Как отмечалось выше, значительная часть горнодобывающих предприятий сталкивается с усложнением условий добычи полезных ископаемых. Для решения проблем, возникающих при эксплуатации оборудования в неблагоприятных условиях, для минимизации и устранения влияния человеческого фактора на горных предприятиях мира и РФ используют безлюдные технологии, реализованные за счет применения роботизированных горных машин с интеллектуальными системами автоматического управления. Возможности использования безлюдных технологий общепризнаны, достаточно обратиться к следующим статистическим данным: к 01.05.2022 г. количество беспилотных карьерных самосвалов, находящихся в эксплуатации во всем мире, составляло 1068 ед. (01.05.2021 г. – 769), прирост на 39%. Планируется, что к концу 2025 г. эта цифра превысит 1800 единиц. Распределение беспилотных карьерных самосвалов по странам представлено на рис. 5 [8].

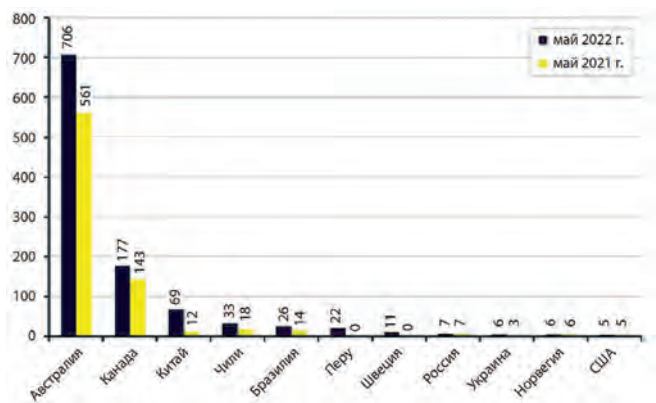


Рис. 5
Распределение беспилотных карьерных самосвалов по странам [8]

Fig. 5
Distribution of unmanned mine trucks by country [8]

Автономные мобильные самоходные машины и беспилотное робототехническое оборудование находят широкое применение в различных областях промышленного производства, а также в непромышленной сфере [9–11]. Чаще всего они функционируют в нестационарных и неопределенных условиях [12], поэтому решение проблемы управления движением таких машин несомненно актуально. Если относительно открытых горных работ имеется концептуальное понимание в разработке и внедрении беспилотного карьерного оборудования, а именно самосвалов, то для условий подземных горных работ реализация беспилотного самоходного оборудования находится на этапе пилотных проектов и ОКР, например, самоходных модульных аппаратов [13] и так называемых автономных автомобилей-шаттлов [14]. На этот счет в работе [13] первоочередной задачей использования беспилотного самоходного аппарата (БСА) в шахтах является применение в технологических процессах, в опасных зонах и производственных и аварийных ситуациях, в том числе при мониторинге состояния обстановки в выработке. Концепция построения многомодульных многофункциональных БСА может быть адаптирована не только для мини- и малоразмерных беспилотных аппаратов, но может быть реализована и на буровом, буропогрузочном, транспортном и проходческом оборудовании.

Поэтому для решения обозначенной проблемы требуется провести теоретические и экспериментальные исследования и разработать теоретические положения создания управляющих систем для интеллектуальных роботизированных горных машин (на примере шахтной гусеничной бурильной установки), которые будучи адаптированными к изменяющимся условиям внешней среды шахты (подземного рудника) станут основой построения интеллектуальной системы формирования и реализации маршрута в соответствии с целевым заданием для обеспечения оптимальной и безопасной траектории движения роботизированной гусеничной бурильной установки в подземных горных выработках.

Известно множество методов, применяемых для управления роботизированным оборудованием в среде с препятствиями. К ним можно отнести метод структурного синтеза, использование нечеткой логики, построение навигационной системы, основанной на алгоритме SLAM (табл. 1).

Таблица 1
Методы, применяемые для управления роботизированным оборудованием

Table 1
Methods used to control robotic equipment

Описание метода	Автор
Метод структурного синтеза. Главной особенностью данного метода является задание цели управления, а управление рассматривается в виде аттракторов	Л.М. Бойчук
Рассматривается закон управления, позволяющий строить асимптотически устойчивое движение	В.Х. Пшихопов, Б.В. Топчиев
Предложен метод, позволяющий управлять мобильным роботом в недетерминированной среде со статическими препятствиями. Представлены методы, основанные на использовании нечеткой логики и позволяющие подвижным объектам перемещаться в среде с динамическими препятствиями	M.B. Montaner, A. Ramirez-Serrano, T-L. Lee, C-J. Wu
Метод управления роботом в трехмерной среде с точечными препятствиями. Данный метод создан на базе позиционно-траекторного закона управления. Рассматривается движение объекта вдоль траекторий, состоящих из прямых линий	В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.А. Крухмалев
Проблема генерации стратегии в сложных задачах в условиях отсутствия полной информации о внешней среде. Проведен ряд экспериментов, доказывающих эффективность предложенного метода, заключающегося в способности системы самостоятельно генерировать шаги в среде с неполной информацией	Г.В. Алферов

Результаты

В общем случае решение задачи планирования траектории движения беспилотной роботизированной гусеничной бурильной установки (БРГБУ) определяется необходимостью устранения неопределенности среды и с принятием решения в условиях нескольких альтернатив, т. е. многокритериальности решаемой задачи. Решение

требует разработки планировщиков движения в классе интеллектуальных систем. Под термином «интеллектуальная система управления» понимается система, осуществляющая целеполагание, планирование и управление движением в изменяющихся условиях без взаимодействия с оператором или системой верхнего уровня.

В последнее время большое внимание исследователей уделяется концепции SLAM (simultaneous localization and mapping), которая может существенно способствовать как внедрению беспилотного роботизированного оборудования, так и созданию актуальной на данный момент разработки модели подземной горной выработки (пространства). Идея SLAM подразумевает объединение двух процессов: построение модели окружающего пространства (mapping), как указано в наименовании концепции, и определение местонахождения устройства в этой модели (localization). На данный момент концепция SLAM объединяет большое количество алгоритмов, которые можно классифицировать по области их применения (открытые или замкнутые пространства), по способу реализации (визуальный, с помощью активных зондирующих систем или их сочетание), по способу представления создаваемой модели (одногоипотезное, многоипотезное, с помощью графов). При этом сущность реализации SLAM остается неизменной, а именно на основе входных данных с датчиков устройство получает пространственные ориентиры, относительно местоположения которых определяет свои координаты в определенный момент времени, затем, перемещаясь, повторяет операцию, выполняя поиск соответствий. С технической точки зрения реализация алгоритмов SLAM возможна за счет использования в качестве основных датчиков – камер, лидаров или их сочетания, Visual SLAM, Lidar SLAM и RGB-D SLAM, которые являются тремя наиболее распространенными. Лидар – (LIDAR англ. light identification detection and ranging – световое обнаружение и определение дальности) – это устройство, реализующее технологию получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью электромагнитного излучения. Лидар состоит из трех частей: передатчика, приемника и системы управления. Передатчик содержит источник излучения – лазер и оптическую систему для формирования выходного лазерного пучка, т. е. для управления размером выходного пятна и расходимостью пучка. В абсолютном большинстве конструкций излучателем служит лазер, формирующий короткие импульсы света высокой мгновенной мощности (рис. 6) [15–20].

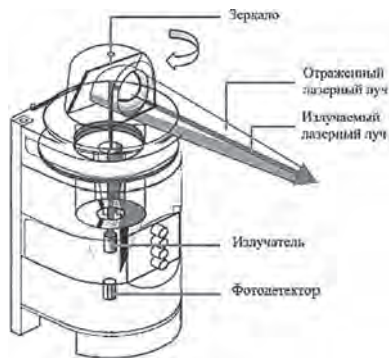


Рис. 6
Общий вид конструкции лидара



Fig. 6
A general view of the lidar design

В условиях подземных горных работ возможны следующие ограничения и ряд неблагоприятных факторов для наиболее полной реализации алгоритмов SLAM: повышенная запыленность и влажность подземных горных выработок и зон работы горного оборудования; перепады температур, связанные с вентилированием горных выработок, удаленностью выработок от ствола шахты, работой оборудования; плохие условия освещения; неправильная форма сечения горных выработок; общая геометрия горных выработок. С точки зрения перемещения БРГБУ в подземных горных выработках интуитивно понятно, что если технический объект эксплуатируется и функционирует в трехмерной среде, то это проявляется в большем числе возможных траекторий и ограничений, накладываемых на траекторию перемещения и выполнения рабочих операций, усложнением процессов планирования. Нами разработана и реализована структурно-функциональная схема интеллектуальной позиционно-траекторной системы управления БРГБУ (рис. 7).



Рис. 7
Структурно-функциональная схема интеллектуальной позиционно-траекторной системы управления БРГБУ

Fig. 7
A structural and functional diagram of the smart positioning and path control system of the unmanned robotic track-based drilling unit

На борту установки находится навигационная система, позволяющая определить собственное положение машины во внешних координатах и скорость. Система технического зрения позволяет определять координаты препятствий в зоне его действия. На основании данных от навигационной системы и локатора интеллектуальный планировщик выдает коэффициенты квадратичных форм в позиционно-траекторный регулятор, который осуществляет движение вдоль заданной траектории подземной горной выработки. В общем случае в позиционно-траекторный регулятор также поступают данные от датчиков исполнительных механизмов. В итоге БРГБУ необходимо попасть в заданную часть забоя для осуществления рабочих операций (обустройство забоя), поэтому при моделировании используется позиционное управление, позволяющее планировщику формировать целевую точку, в которую должна попасть установка в соответствии с производственным заданием, требования по скорости на данном этапе не предъявляются.

Заключение

Проблема увеличения глобального спроса на полезные ископаемые обозначила необходимость модернизации и

совершенствования не только методов и технологий их извлечения, но и создания и применения горных машин, обеспечивающих возможность удаления операторов из пыльных, шумных и потенциально опасных условий подземных горных работ. В последние десятилетия вектор развития научно-исследовательских разработок был направлен на создание полностью автономных роботизированных машин, для выполнения основных операций технологическо-

го цикла добычи полезных ископаемых. Предложенный в данной работе подход по использованию концепции SLAM позволяет оптимизировать траекторию перемещения БРГБУ, построить карту подземного пространства и определить позицию машины на ней.

Список литературы

1. Жданев О.В. *Обеспечение технологического суверенитета отраслей ТЭК Российской Федерации в условиях снижения импорта зарубежных технологий, оборудования и сервисных услуг* [дис. ... д-ра техн. наук]. М.; 2022. Режим доступа: https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/sciens/dissertacii/2023/zhdaneev-dissertaciya-v-vide-nauchnogo-doklada_1.pdf
2. Жданев О.В. Оценка уровня локализации продукции при импортозамещении в отраслях ТЭК. *Экономика региона*. 2022;18(3):770–786. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-3-11>
3. Великанов В.С., Дёрина Н.В., Кочержинская Ю.В., Мамай Н.В., Логунова Т.В. Применение задачи о брахистохроне в исследовании траектории спуска сосуда на открытых горных работах. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2022;20(4):5–14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14>
4. Benecke N., Hancock P., Weber M. Latest developments in the practice of shaft inspection. In: *16th international congress for mine surveying, Brisbane, Australia, 12–16 Sept. 2016*, pp. 65–71.
5. Ананьев П.П., Мещеряков Р.В., Костеренко В.Н., Ким М.Л., Концевой А.С. Управление РТК для мониторинга и обследования подземных выработок. В кн.: Каляева И.А., Черноусько Ф.Л., Приходько В.М. (ред.) *Прогресс транспортных средств и системы-2018: материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Волгоград, 9–11 октября 2018 г.* Волгоград: Волгоградский государственный технический университет; 2018. С. 164–165.
6. Великанов В.С. Актуальность создания учебных центров внутрифирменной подготовки кадров на базе крупных горнодобывающих компаний. *Горная промышленность*. 2015;(4):36–38.
7. Великанов В.С., Усов И.Г., Абдрахманов А.А., Усов И.И. Моделирование и оптимизация режимов работы горных машин с использованием среды MATLAB. *Горный журнал*. 2017;(12):78–81. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.15>
8. Воронов А.Ю., Воронов Ю.Е., Сыркин И.С., Назаренко С.В., Юнусов И.Ф. Обзор систем безлюдных грузовых перевозок на карьерах. *Уголь*. 2022;(S12):30–36. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-30-36>
9. Певзнер Л.Д., Ким М.Л. Робототехника в горном деле. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(1):240–251.
10. Певзнер Л.Д., Ким М.Л. Робототехнические средства и системы для решения задач ликвидации аварий в шахтах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(S1):215–223.
11. Наговицын О.В., Возняк М.Г. Влияние роботизированных технологий на безопасность ведения открытых горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(12-1):52–62. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_52
12. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедева Е.М. Гибридный алгоритм ситуационного планирования траектории на плоскости в условиях частичной неопределенности. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение*. 2018;(1):76–93. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-1-76-93>
13. Липанов А.М., Артемьев В.Б., Петрушин С.А., Костеренко В.Н., Мутьгуллин А.В., Концевой С.И. и др. Концепция создания беспилотного самоходного аппарата для работы в угольных шахтах. Часть 1. *Горная промышленность*. 2022;(5):52–63. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-52-63>
14. Androulakis V. *Development of an autonomous navigation system for the shuttle car in underground room & pillar coal mines*. Theses and Dissertations–Mining Engineering. 2021. 61. <https://doi.org/10.13023/etd.2021.130>
15. Павловский В.Е., Павловский В.В. Технологии SLAM для подвижных роботов: состояние и перспективы. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016;17(6):384–394. <https://doi.org/10.17587/mau.17.384-394>
16. Сафиуллин Р.Н., Афанасьев А.С., Резниченко В.В. Концепция развития систем мониторинга и управления интеллектуальных технических комплексов. *Записки Горного института*. 2019;237:322–330. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.322>
17. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Крухмалев В.А. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами в трехмерной среде с точечными препятствиями. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015;(1):238–250.
18. Богуславский А.А., Боровин Г.К., Карташев В.А., Павловский В.Е., Соколов С.М. *Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления*. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша; 2019. 228 с.
19. Кульченко А.Е., Лазарев В. С. Использование виртуальной целевой точки для планирования движения подвижного объекта в 3D. *Инженерный вестник Дона*. 2016;(4). Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/382>
20. Урваев И.Н. Навигация мобильного робота на основе методов лазерной дальнометрии. *Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2021;(1):44–51. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2021-1-5>

References

1. Zhdaneev O.V. *Ensuring technological sovereignty of the fuel and energy sectors of the Russian Federation in conditions of reduced imports of foreign technologies, equipment and services*. Dr. Sci. (Eng.) diss. Moscow; 2022. (In Russ.) Available at: https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/sciens/dissertacii/2023/zhdaneev-dissertaciya-v-vide-nauchnogo-doklada_1.pdf
2. Zhdaneev O.V. Assessment of product localization during the import substitution in the fuel and energy sector. *Economy of Regions*. 2022;18(3):770–786. (In Russ.) <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-3-11>
3. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Kocherzhinskaya Yu.V., Mamay N.V., Logunova T.V. The brachistochrone problem applied in the study on a conveyance descending trajectory in open pit mining. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2022;20(4):5–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14>
4. Benecke N., Hancock P., Weber M. Latest developments in the practice of shaft inspection. In: *16th international congress for mine surveying, Brisbane, Australia, 12–16 Sept. 2016*, pp. 65–71.

5. Ananiev P.P., Meshcheryakov R.V., Kosterenko V.N., Kim M.L., Kontsevoi A.S. Control of a mobile robotic system for monitoring and inspection of underground workings. In: Kalyaeva I.A., Chernousko F.L., Prikhodko V.M. (eds) *Progress of Vehicles and Systems-2018: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Volgograd, October 9–11, 2018*. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2018, pp. 164–165. (In Russ.)
6. Velikanov V.S. On the importance of the establishment of company-specific personnel training centers on the basis of large mining corporations. *Russian Mining Industry*. 2015;(4):36–38. (In Russ.)
7. Velikanov V.S., Usov I.G., Abdrakhmanov A.A., Usov I.I. Modeling and optimization of mining machine operation modes with MATLAB. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(12):78–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.15>
8. Voronov A.Yu., Voronov Yu.E., Syrkin I.S., Nazarenko S.V., Yunusov I.F. A Review of unmanned haulage systems at open-pit mines. *Ugol'*. 2022;(S12):30–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-30-36>
9. Pevzner L.D., Kim M.L. Robotics in mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(1):240–251. (In Russ.)
10. Pevzner L.D., Kim M.L. Robotic equipment and systems for solving the elimination mining accidents. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(S1):215–223. (In Russ.)
11. Nagovitsyn O.V., Voznyak M.G. Impact of robotic technologies on open mining safety. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(12-1):52–62. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_52
12. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.M. Hybrid algorithm of situational trajectory planning under partial uncertainty. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2018;(1):76–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-1-76-93>
13. Lipanov A.M., Artemiev V.B., Petrushin S.A., Kosterenko V.N., Mutygullin A.V., Kontsevov S.I. et al. A concept of an unmanned self-propelled vehicle for operation in coal mines. Part 1. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):52–63. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-52-63>
14. Androulakis V. *Development of an autonomous navigation system for the shuttle car in underground room & pillar coal mines*. Theses and Dissertations–Mining Engineering. 2021. 61. <https://doi.org/10.13023/etd.2021.130>
15. Pavlovsky V.E., Pavlovsky V.V. SLAM technologies for the mobile robots: state and prospects. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2016;17(6):384–394. (In Russ.) <https://doi.org/10.17587/mau.17.384-394>
16. Safiullin R.N., Afanasyev A.S., Reznichenko V.V. The concept of development of monitoring systems and management of intelligent technical complexes. *Journal of Mining Institute*. 2019;237:322–330. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.322>
17. Pshikhopov V.K., Medvedev M.Yu., Krukhmalev V.A. Position-trajectory control of vehicle in 3D with point obstacles. *Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*. 2015;(1):238–250. (In Russ.)
18. Boguslavsky A.A., Borovin G.K., Kartashev V.A., Pavlovsky V.E., Sokolov S.M. *Models and algorithms for smart control systems*. Moscow: Institute of Applied Mathematics. M.V. Keldysh; 2019. 228 p. (In Russ.)
19. Kulchenko A.E., Lazarev V.S. Use virtual point for path-planning of vehicle in 3D. *Engineering Journal of Don*. 2016;(4). (In Russ.) Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/382>
20. Urvaev I.N. Mobile robot navigation based on laser range methods. *Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2021;(1):44–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2021-1-5>

Информация об авторах

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация, профессор кафедры автоматизации и компьютерных технологий, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>; e-mail: v.s.velikanov@urfu.ru

Овчинникова Валентина Андреевна – директор Уральской передовой инженерной школы, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8084-3651>; e-mail: ova@urfu.ru

Гришин Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8010-7542>; e-mail: igorgi@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.02.2023

Поступила после рецензирования: 27.03.2023

Принята к публикации: 07.04.2023

Information about the authors

Vladimir S. Velikanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Hoisting and Hauling Machines and Robots, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation, Professor, Department of Automatics and Computer Technologies, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>; e-mail: v.s.velikanov@urfu.ru

Valentina A. Ovchinnikova – Director, the Urals Advanced Engineering School, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8084-3651>; e-mail: ova@urfu.ru

Igor A. Grishin – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Geology, Mine Surveying and Mineral Processing, Novos Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8010-7542>; e-mail: igorgi@mail.ru

Article info

Received: 12.02.2023

Revised: 27.03.2023

Accepted: 07.04.2023