

**Наумов Валерий Николаевич** – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: makon111@rambler.ru; 105005, г Москва, ул. 2-я Бауманская, 5; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Машков Константин Юрьевич** – e-mail: makon111@rambler.ru; к.т.н.; доцент.

**Пехтерев Алексей Александрович** – e-mail: lexpekhterev@gmail.com; студент.

**Рубцов Василий Иванович** – e-mail: rubtsov@mail.ru; тел.: 89175791277; к.т.н.; доцент.

**Naumov Valery Nikolaevich** – Bauman Moscow State Technical University; makon111@rambler.ru; 5, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

**Mashkov Konstantin Urevich** – e-mail: makon111@rambler.ru; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Pehterev Alex Alexandrovich** – e-mail: lexpekhterev@gmail.com; student.

**Rubtsov Vasily Ivanovich** – e-mail: rubtsov@mail.ru; phone: +79175791277; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 629.33.03-83

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-4254

**М.И. Маленков, А.Н. Богачев, В.А. Волков, Н.К. Гусева, А.Г. Конколович,  
Д.Н. Кузьменко, В.М. Курдюк, Е.А. Лазарев, А.Б. Федорушков,  
Д.Б. Федорушков**

### **НОВЫЕ ПРОЕКТНО-КОМПОНОВОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОДВИЖНОСТИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЛАНЕТОХОДОВ\***

*В статье изложены основные итоги выполнения прикладных исследований по теме «Создание научно-технических решений в области разработки робототехнических систем (РТС) космического назначения для обеспечения напланетных миссий». Главное внимание уделено совершенствованию проектно – компоновочных решений ключевых систем планетоходов нового поколения, определяющих площадь и геоморфологические свойства территорий, доступных для проведения научных исследований, а также эффективность поддержки деятельности человека на поверхности небесных тел. Доступность исследуемых поверхностей Луны и Марса в режимах автономно – автоматического и дистанционного управления прямо зависит от свойств систем передвижения и навигации. На повышение функциональных возможностей РТС также оказывает влияние бортовая манипуляционная система. В качестве лучших образцов для сравнительной оценки научно – технического уровня новых технических решений, выбраны действующие американские марсоходы «Opportunity» и «Curiosity», демонстрирующие высокие эксплуатационные характеристики, в частности, по ресурсу работы, качеству и надежности бортовых систем. Однако в части проходимости, свойства марсоходов далеки от оптимальных характеристик. Есть резервы и для существенного повышения подвижности, обобщенным параметром которой является время, затраченное на передислокацию из одного обследованного района в другой. Повышение подвижности связано не только с проходимостью, но требует также равенности прямого хода и реверса по качеству решения навигационных задач. Требуется непрерывный контроль пройденного пути и коэффициента буксования колес, применение контактных методов определения прочности грунта по трассе движения. Итогом исследований стала разработка, на основе отечественного научно – технического задела, проектных решений в виде 3D модели РТС «Помощник космонавта».*

*Система передвижения; навигация; техническое зрение; манипуляционная система, колесно-шагающий движитель, активная подвеска, механизм шагания, контейнер, планетоходы.*

\* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки: проект № 14.576.21.0050, идентификационный номер RFMEFI57614X0050.

**M.I. Malenkov, A.N. Bogachev, V.A. Volov, N.K. Guseva, A.G. Konkolovich,  
D.N. Kuzmenko, V.M. Kurdzyuk, E.A. Lazarev, A.B. Fedorushkov,  
D.B. Fedorushkov**

**NEW DESIGN & LAYOUT SOLUTIONS AIMED AT THE INCREASE OF  
THE MOBILITY AND FUNCTIONAL CAPABILITIES OF THE PLANETARY  
ROVERS**

*The paper presents the major results of the execution of the applied scientific researches "The elaboration of the scientific-technical solutions in the area of the development of the robotic systems (RS) of the space designation to support the on-planet missions. The researches and developments in the priority directions of the development of the Russian scientific&technical complex for the period 2014-2020". A special emphasis is placed on the improvements of the design&layout solutions implemented in the key systems of the new generation planet rovers, that determine the area and geomorphological properties of the territories that are accessible for the scientific researches and the efficiency of the supporting the human activities on the celestial body surfaces. The accessibility of the investigated surfaces of the Moon and Mars for the automatic and remote control modes is directly dependent on the characteristics of the locomotion and navigation systems. The on-board manipulating system also influences the functional capabilities of a robotic system. In order to compare the technical level of new design solutions, the US Mars rovers "Opportunity" and "Curiosity", which are currently in operation, are chosen. These rovers set very high performance marks for the operational lifetime and the quality and reliability of the on-board systems; they are the ones of the best specimens in the mobile robotics. However, in regard of the traversability, the performances of the Mars rovers are far from being optimal. There are also certain reserves to considerably increase the mobility, which generalized parameter is the time, spent to relocate a rover from one research region to another. The increase of the mobility is bound not only to traversability increase, but it also requires to equalize the capabilities of forward and backward locomotion regarding the quality of the navigation task solutions. It is necessary to conduct the continuous check of the covered route and wheel slippage coefficient, to use the contact methods to determine the soil strength along the locomotion path. The result of the applied scientific research is the development of the design and layout solutions made in a form of a 3D model of the Robotic System "Astronaut Assistant". This development is based on Russian scientific and technical background.*

*Locomotion system; navigation system; machine vision; manipulation system; wheel-walking propulsor; active suspension; walking mechanism; container; planetary rovers.*

**Введение.** Статья посвящена проектным исследованиям мобильной робототехнической системы «Помощник космонавта» (РТС ПК), которая призвана расширить заменить космонавтов при выполнении рутинных и опасных операций в процессе изучения и освоения Луны, планет и других небесных тел [1, 2].

Проектирование подобных систем опирается на научно – технический задел, полученный при создании первого в мире Лунохода-1 [3–6] и ходовых макетов планетоходов в рамках советских, российских, а также международных программ [7–12]. Необходимо также учитывать современный опыт проектирования и многолетней эксплуатации на Марсе американских марсоходов, демонстрирующих высокие качество, надежность и ресурс бортовых систем [13–15].

Прогресс в части систем передвижения (СП) в может быть обеспечен за счет гибридного колесно – шагающего движителя (КШД), применение которого в составе планетоходов было теоретически обосновано [16, 17] и подтверждено отечественными исследователями в процессе испытаний ходовых макетов на естественных полигонах и в грунтовых каналах, и при математическом моделировании [18].

Некоторые направления дальнейшего проектного развития концепции КШД при выполнении прикладных исследований отражены в [19–21]. В публикациях [22] рассмотрены кинематические схемы и некоторые аспекты расширения РТС ПК своих операционных возможностей для поддержки научных исследований и работ на поверхности Луны и Марса за счет применения двурукой манипуляционной системы (МС).

Цель статьи – краткое обобщение сути новых технических решений по конструкции и алгоритмам управления систем передвижения, навигации, и манипуляционной системы, а также краткая формулировка новых качеств планетоходов, который можно достичь при реализации этих решений.

**1. Новые технические решения по системе передвижения.** В состав модели РТС ПК (рис. 1) входят следующие составные части: главный компонент СП – самоходное шасси (СШ), контейнер с габаритно – массовыми макетами встроенного в него герметичного приборного отсека, а также с макетами бортового навесного оборудования (солнечные батареи, антенны), двурукая МС, носовой и кормовой кронштейны для установки МС и съемного навесного оборудования. Приборный отсек предназначен для размещения и теплового регулирования электронной аппаратуры и аккумуляторных батарей служебных бортовых систем. В нем резервированы объемы для электронной аппаратуры научного оборудования.

Габаритные размеры РТС ПК приведены на рис. 1 в номинальном положении рычагов механизмов шагания (МШ). Координата центра масс по вертикальной оси относительно опорной поверхности в этом положении составляет 720 мм. Колесная база регулируется в пределах от 1130 мм (короткая база) до 1770 мм (длинная база). Клиренс (дорожный просвет) регулируется в пределах от 209 мм (минимальный клиренс) до 529 мм (максимальный клиренс). Колея не регулируется.

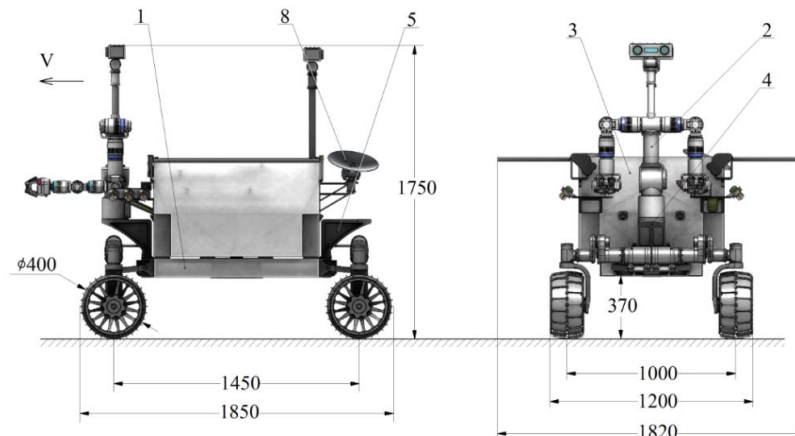


Рис. 1. Проектно – компоновочный вариант робототехнической системы «Помощник космонавта»: 1 – самоходное шасси системы передвижения; 2 – двурукая манипуляционная система; 3 – контейнер со встроенной и навесной служебной аппаратурой; 4, 5 – носовой и кормовой несущие кронштейны; 6 – полки для инструментов и принадлежностей ДМС, 8 – остро направленная антенна

В ТЗ не заданы требования к проектному облику, правильный выбор направлений разработки которого оставлен на усмотрение разработчиков. Этот выбор сделан авторами на основе собственного опыта проектирования СП ходовых макетов, главным образом, космического назначения, а также на основе анализа современных отечественных и зарубежных разработок. В качестве целевых функций приняты следующие требования к конструкции и алгоритмам управления СП:

- ♦ исключение опасности потери подвижности вследствие недостаточной опорной проходимости при преодолении крутых подъемов на слабо связанных грунтах типа мелкозернистого лунного реголита и песчано – пылевых марсианских образований;

- ◆ исключение из состава РТС ПК балласта – механизмов одно разового пользования, для развертывания ходовой части из транспортного в рабочее положение;
- ◆ обеспечение возможности работы подвески в активном режиме для уменьшения количества маневров по объезду и адаптации к рельефу;
- ◆ обеспечение возможности движения по сравнительно ровной местности с использованием только балансирной подвески с механизмом синхронизации вертикальных перемещений (хода) ходовых колес;
- ◆ реализация перечисленных целей с сохранением транспортных габаритов и с минимальным увеличением массы.

1-я цель, критерием реализации которой может служить преодоление подъёмов с углами естественного откоса слабо связного грунта, достигается путем применения в составе СП гибридного движителя, способного реализовать колесное шагание. Механизмы шагания КШД обеспечивают и реализацию 2-ой цели – развертывание из транспортного положения в рабочее. При этом габаритные размеры РТС ПК вписываются в параллелепипед со сторонами 1600x1200x1000 мм.

Для достижения 3-ей цели были синтезированы новые схемы КШД и предусмотрена установка таких сенсоров, которые позволяют выполнить регулирование положения колес по вертикали в движении, по автоматическим алгоритмам.

4-я цель, реализация которой позволяет резко снизить энергетические затраты на движение, достигается путем синтеза новых схем гибридной, пассивно–активной подвески, обеспечивающей автоматическое подключение к работе электромеханических приводов активной подвески только при превышении ограниченных упорами углов поворота балансиров подвески.

Неизбежным следствием преобразования колесного движителя в колесно – шагающий является увеличение массы приводных механизмов ходовой части. Поэтому достижение 5-ой цели возможно только при уменьшении количества опор планетохода.

Этим обстоятельством обосновывается переход от шести колесного самоходного шасси современных американских марсоходов и китайского лунохода к четырех колесному. Образовавшийся резерв масс позволяет оснастить все мотор – колеса приводными МШ с минимальным увеличением массы СШ.

Таким образом, колесная формула СП РТС ПК, с учетом традиций теории автомобиля, может быть представлена как: 4x4x4x4, где первая цифра обозначает количество ходовых колес, вторая – количество приводных колес, третья – количество поворотных колес, а четвертая – количество колес, снабженных МШ. Получающиеся при этом мехатронные агрегаты ходовой части, можно назвать опорно – движительными модулями (ОДМ).

Опыт эксплуатации американских марсоходов показал системные проблемы корректной оценки прочности грунта с помощью дистанционных методов, на основе бортовой оптико-электронной аппаратуры высокого разрешения орбитальных станций поддержки планетных миссий [19, 20]. Отчетливо проявились и недостатки дискретных визуальных методов оценки пройденного пути. Необходим непрерывный контроль коэффициента буксования колес.

Только в этом случае блок автоматики шасси (БАШ) способен своевременно выдать команду на остановку движения при критичном увеличении буксования. Это добавляет еще одну, 6-ю целевую функцию СП по безопасности движения:

- ◆ автоматическая остановка движения при не только в случаях, предусмотренных БАШ Лунохода-1, но и при критичном буксовании колес.

Поэтому в состав СП, помимо СШ и БАШ, входят компоненты подсистемы безопасности движения, включающие датчик крена и дифферента (ДКД), оптический одометр с непрерывным режимом измерений, а также контактный прибор оценки проходимости (ПрОП).

Ходы активной и пассивной подвесок обеспечивают преодоление препятствий высотой до 0,5 м. При этом пассивная подвеска обеспечивает, без подключения МШ, постоянный контакт всех четырех ходовых колес с грунтом при движении по неровной трассе с высотой неровностей в пределах  $\pm 180$  мм, а также при преодолении одним колесом одиночных препятствий высотой до 360 мм на ровной площадке.

Благодаря тому, что полный ход активной подвески составляет 160 мм, крен и дифферент рамы не увеличивается и при преодолении колесом одного борта одиночного выступа высотой 500 мм. При наличии выступов под обоими бортами углы крена и дифферента рамы снижаются, так что при благоприятном относительном положении одиночных препятствий, рама, при работе активных подвесок всех четырех ОДМ, может выйти в горизонт (рис. 2), как и рама СШ с подвесками типа Rocker Bogie [13] и трехточечной подвеской [21].

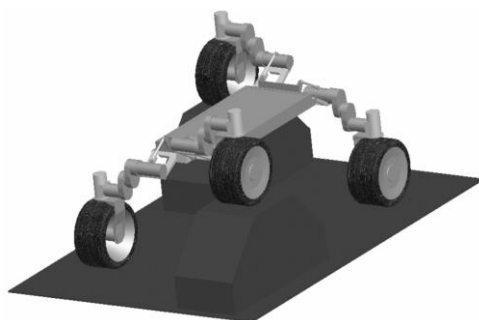


Рис. 2. Фрагмент совместной работы активной и пассивной подвески при преодолении препятствий высотой 500 мм двумя колесами одновременно на горизонтальной площадке

Работа активной подвески также обеспечивает горизонтальное положение корпуса при движении по синусоидальному профилю с амплитудой до 160 мм и длиной полуволны, равной колесной базе, со скоростью не более 400 м/ч.

В конструкции СШ удалось реализовать еще одну, 7-ю целевую функцию:

- ◆ унификация до полной взаимозаменяемости всех четных (по количеству) деталей и сборок СШ.

СШ РТС ПК включает в свой состав четное количество блоков ОДМ (рис. 3), позволяющих унифицировать приводные механизмы шагания и механизмы подвесок.

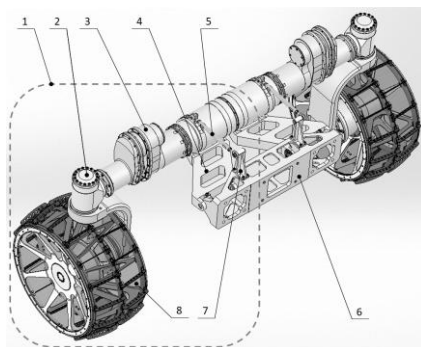


Рис. 3. Фрагмент полной модели блока опорно – движительных модулей:  
1 – опорно-двигательный модуль, в том числе: 2 – рулевой механизм с поворотным рычагом; 3 – привод шагания; 4 – балансир; 5 – реактивная тяга; 6 – несущий кронштейн; 7 – кронштейн реактивной тяги; 8 – мотор – колесо

Прототипами колес СШ РТС ПК послужили металлические жесткие колеса Лунохода-1, представляющие собой редкое сочетание удачных технических решений группы исследователей, конструкторов, технологов, материаловедов и сборщиков. Ключевым компонентом колеса является наружный обод, определяющий качество взаимодействия с грунтом – тяговое усилие и коэффициент сопротивления движению. В своё время колеса показали отличные результаты при наземных испытаниях на кварцевом и вулканическом песке и при эксплуатации на лунном реголите. Однако во время ходовых испытаний на россыпях прочных камней с острыми кромками, сетка теряет форму и рвется.

Поэтому при создании металлических колес будущих марсоходов, наружный обод будет сплошным. Для того, чтобы обеспечить наиболее простую замену сетчатого обода на сплошной, наружный обод колеса универсального для Луны и Марса СШ РТС ПК, связан со ступицей колеса не спицами, а сварной пространственной конструкцией, образующей, вместе с ободами, прочный несущий каркас.

Луноход-1 реализует поворот на месте и в движении бортовым способом, как гусеничные машины. Поэтому его колеса снабжены косыми (расположенными под углом к оси вращения колеса) грунтозацепами. Это снижает сопротивление боковому скольжению колес и приводит к различию правых и левых колес. При наличии рулевых механизмов в составе ОДМ РТС ПК смысл в косых грунтозацепах теряется. Использование прямых грунтозацепов позволяет унифицировать все колеса СП с любой колесной формулой и унифицировать ОДМ в целом.

Колесо имеет встроенный тяговый привод, который, через датчик сил и моментов, крепится к поворотному рычагу. Рычаг является выходным звеном рулевого механизма и вращается его приводом. Весь рулевой механизм с мотор-колесом установлен на фланце выходного вала второго рычага МШ.

Для выполнения 7-ой целевой функции была решена задача взаимозаменяемости двух блоков ОДМ – переднего и заднего. Применение параллелограммных подвесок колес в совокупности с новым механизмом синхронизации и новым характером связей тягового привода мотор – колес с подвеской, позволили реализовать 8-ю целевую функцию СШ, оказывающую влияние на технический облик РТС ПК и его эксплуатационные характеристики:

- ♦ обеспечение плоско – параллельного движения колес с их рулевыми механизмами при качании балансиров во всем диапазоне ходов пассивной подвески и при работе активной подвески во всем диапазоне ходов МШ.

Это гарантирует, в частности, сохранение положения оси шкворня рулевого механизма во всем диапазоне вертикального хода колеса при работе пассивной и активной подвесок. Проекция оси шкворня на опорную поверхность всегда находится в центре пятна контакта колеса с этой поверхностью.

СШ имеет две номинальные скорости движения в колесном режиме при работе тягового двигателя на одной и той же механической характеристике. Регулирование скорости при существенном изменении рельефа и свойств грунта, осуществляется с помощью встроенных планетарных коробок перемены передач (КПП) с управлением от электромагнитов. Такое решение позволяет роботизировать процесс переключения передач и, одновременно со снижением скорости, во столько же раз увеличить динамический фактор  $D$ .

Совместное применение в одной конструкции КПП и ШИМ регулирования для двигателей тяговых приводов и приводов шагания позволяет ограничить динамические нагрузки при разгоне и торможении и согласовать скорости вращения колес и рычагов МШ при реализации КШР и при работе МШ в режиме активной подвески и существенно снизить потребляемую мощность двигателя.

КПП отработана в конструкции нескольких ходовых макетов планетоходов и мобильных робототехнических комплексов [8], а работа КПП в составе мотор – колес планетохода исследовалась при математическом моделировании. В составе США реальных планетоходов такое решение еще не применялось.

Сенсоры СП и группа безопасности БАШ обеспечивают отмену выполняемых команд и выдачу команды «Стоп» для немедленного предотвращения аварийных ситуаций, включая зарывание колес в слабо связном грунте. БАШ обеспечивает автоматическое переключение МШ в КШР с равномерной прерывной походкой, и в режим работы в качестве активной подвески. БАШ размещается в теплоизолированном герметичном приборном отсеке вместе с электронной аппаратурой служебных бортовых систем и связан кабельной сетью со всеми четырьмя ОДМ.

**2. Новые технические решения по системе навигации и манипуляционной системе.** Опыт эксплуатации американских марсоходов подтвердил важность реализации новой целевой функции системы навигации:

- ♦ равноценность прямого хода и реверса.

В существующих аналогах поле зрения обзорных камер, размещенных на мачте в носовой части марсохода, частично перекрывается фрагментами навесного оборудования. Постоянное маневрирование для лучшего обзора местности снижало и без того невысокую скорость движения.

Чтобы исключить этот недостаток на борту организованы две симметрично размещенные и полностью дублирующие друг друга системы навигации (СН): носовая СН работает на базе СТЗ ДМС, а кормовая – на базе СТЗ РТС ПК.

Поддержка эффективной деятельности научного оборудования американских марсоходов нового века осуществляется с помощью МС, снабженных приборной головкой револьверного типа. Так, манипулятор Curiosity, имеющий 5 степеней подвижности, массу 70 кг, способный оперировать турелью с приборами общей массой 30 кг, в течение 4-х лет эксплуатации позволил успешно выполнить многочисленные исследования на грунте и его эффективность не вызывает сомнений. Но вот произвести бурение реголита, которое астронавты программы Apollo выполняли с помощью ручного бура, специализированный манипулятор не способен. Отсутствие схвата не позволяет таким манипуляторам поддерживать операции со служебной аппаратурой на борту марсохода. Учитывая это, целевая функция для МС РТС ПК сформулирована следующим образом:

- ♦ разработка унифицированной для Луны и Марса, двурукой МС (ДМС) с физическими и интеллектуальными ресурсами, достаточными для дублирования функций космонавта и поддержки работы бортовых приборов.

В состав ДМС входят (рис. 1): СТЗ ДМС, два одинаковых манипулятора, каждый из которых имеет 7 степеней подвижности, привод наклона, привод поворота, несущая конструкция (корпус), предназначенная для механического сопряжения компонентов, два трех палых схвата, с пятью степенями подвижности каждый, и кабельная сеть.

Блок автоматики ДМС предназначен для электрического и информационного сопряжения ДМС с системами РТС ПК. Он размещается в герметичном приборном отсеке. Остальные компоненты ДМС, включая СТЗ, при доставке РТС ПК к месту эксплуатации размещаются в негерметичном объеме контейнера, закрытого панелями СБ с уплотнениями от попадания пыли при посадке.

В комплект принадлежностей ДМС входят радиоизотопные источники тепла (РИТ), совместимые со схватами манипуляторов, чехлы, сшитые из матов экранно – вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), разборный, для компактного размещения в контейнере, ПрОП, щетка для очистки панелей СБ в случае аварийного попадания на них пыли и грунта, ковш для забора грунта с поверхности.

Две руки позволяют производить сборку – разборку ПрОП и непосредственное проведение исследований на грунте (рис. 4). В сочетании с трехпальными схватами для ДМС возможно выполнение сборочных и монтажных операций, требующих поддержки сборочных модулей, с применением электроинструментов.

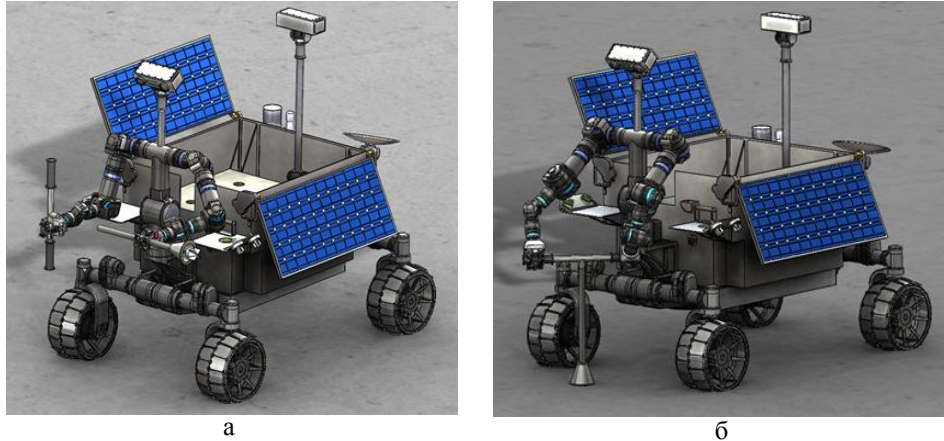


Рис. 4. Сборка штампа прибора оценки проходимости с ручкой этого прибора (а) и проведение измерений ФМС грунта по трассе движения (б)

Операции ДМС предусматривают установку РИТов в специальные отверстия приборного герметичного отсека до контакта с его тепловой плитой. При наступлении лунного дня, ДМС производит демонтаж РИТов и их безопасное закрепление на специальной полке контейнера. Так могут быть решены и тепловые проблемы наружных блоков СТЗ РТС ПК и СТЗ ДМС.

После монтажа РИТов на блоки СТЗ, манипуляторы ДМС должны одеть на эти блоки чехлы ЭВТИ. С наступлением лунного дня чехлы демонтируются и укладываются в контейнер. Выполнение этих операций одновременными действиями двух рук существенно повышает надежность теплоизоляции и её целостность при многократном использовании.

### 3. Тактико-технические и габаритно-массовые характеристики РТС ПК.

С учетом изложенного, РТС ПК обеспечивает следующие функции при прямом ходе и реверсе: движение в колесном режиме (КР) с регулируемой скоростью и динамическим фактором при работе балансирной пассивной подвески; движение в КР на совместной работе пассивной и активной подвесок; движение с равномерной прерывной походкой в КШР; остановочное торможение в перечисленных критических ситуациях; стояночное торможение.

Что касается маневренности, то, как и американские марсоходы, РТС ПК обеспечивает поворот на месте на произвольный угол (с предварительным разворотом плоскости вращения колес) с радиусом равным нулю и кинематический поворот с заданным радиусом. Отказ от средних колес дает, без малейших усложнений, совершенно новое качество при маневрировании – машина может двигаться боком (иногда такой способ называют движением «крабом»), не меняя положения продольной оси контейнера.

Вождение может осуществляться в режимах дистанционного и автономно-автоматического управления. Во втором варианте выдерживается заданное с Земли стратегическое направление, а локальные маршруты прокладываются на борту на основе анализа моделей поверхности, получаемых при прямом ходе от СТЗ ДМС, а на реверсе – от СТЗ РТС ПК.



В зависимости от положения звеньев КПП, скорость в колесном режиме может регулироваться в пределах от 0 до 430 м/час на первой передаче при движении на подъеме до 25° на связном грунте и от нуля до 1,5 км/час – на второй передаче при движении на подъемах не более 5° – 7°.

Движение в КШР осуществляется только на первой передаче. При этом скорость движения составляет всего 25 м/час, но на этой скорости преодолевается подъем 30° и более по слабо связному грунту с низкой несущей способностью.

ДМС осуществляет операции с инструментами и ручным буром научной аппаратуры во время стоянки на ровной поверхности, близкой к горизонтальной площадке. Возможно перемещение грузов, захваченных схватами ДМС на небольшие расстояния (несколько метров) на ровных площадках с контролем распределения нормальных реакций по колесам СШ. Возможна работа РТС ПК в связке со съемной грузовой МС и съемным навесным оборудованием, которые в этом случае монтируются на заднем несущем кронштейне 5 (рис. 1).

Для удобства сравнения, полная масса РТС ПК с научным оборудованием принята равной полной массе Лунохода-1, которая составляла 756 кг. Поскольку проектом предусмотрена практически полная унификация СП и ДМС для Луны и Марса, то для сохранения идентичности статических режимов эксплуатации приводов этих систем, полная масса РТС ПК с научным оборудованием для эксплуатации на поверхности Марса должна соответствовать условию:

$$m_M = m_L \frac{g_L}{g_M},$$

где  $m_M$  – полная масса РТС ПК (марсианское исполнение),  $g_M$  – ускорение свободного падения на поверхности Марса.

Поскольку  $g_L = 1,62 \text{ м/с}^2$ ,  $g_M = 3,76$  (экваториальные области), то полная масса РТС ПК с научным оборудованием при её эксплуатации на Марсе не должна превышать 325 кг.

Разработка электронных моделей позволила получить проектные массовые сводки компонентов РТС ПК. Так проектная масса СП РТС ПК равна 110 кг, в которых 96 кг приходится на СШ, несущая рама которого составляет 12 кг.

Для сравнения: масса СП Лунохода-1 составляет 105 кг, из которых масса СШ, для которого роль несущей конструкции выполняет несущее днище герметичного контейнера, составляет 88 кг.

Масса универсального для Луны и Марса ДМС составляет 60 кг. Комплект принадлежностей и инструментов ДМС входит в массу контейнера.

Масса контейнера, без учета научной аппаратуры составляет 93 кг. Масса РТС ПК, включая два несущих кронштейна массой по 3,5 кг, составляет 270 кг. Поскольку полная масса РТС ПК не должна превышать 325 кг, на его борт в марсианской миссии можно взять не менее 55 кг научных приборов и оборудования.

При использовании РТС ПК в лунной миссии имеются возможности и для развития отдельных служебных систем, например, системы терморегулирования, и для съемного навесного оборудования, и для одновременной установки двух манипуляционных систем – ДМС с двумя схватами и МС с научными приборами. Ведь резерв масс полезной нагрузки РТС ПК для Луны составляет 486 кг.

Нужно отметить, что проектная установочная мощность тяговых электродвигателей колес СП РТС ПК составляет 50 Вт. Это всего на 20 % больше установочной мощности тяговых электродвигателей Лунохода-1 при равной полной массе и близких скоростных характеристиках.

**Заключение.** Главным итогом компоновочных и расчетно-теоретических исследований, является разработка и обоснование проектного облика и алгоритмов управления планетохода нового поколения. Система передвижения РТС ПК, в состав которой входит самоходное шасси с колесной формулой 4x4x4x4, представляет универсальную мобильную платформу транспортного средства для Луны и Марса. Она существенно расширяет выполняемые функции и имеет более высокие проектные характеристики подвижности по сравнению с характеристиками реальных марсоходов при близких коэффициентах грузоподъемности, приведенных к единому месту эксплуатации.

Двуручная манипуляционная система расширяет операционные возможности РТС ПК. В частности, она позволяет изменять структуру компонентов системы терморегулирования, способна заменить космонавта на опасных операциях, требующих физических усилий, например, при бурении реголита.

Новые технические решения по системе навигации на основе двух независимых и идентичных СТЗ, размещаемых в носовой и кормовой частях рамы существенно повышают подвижность планетохода и надежность выполнения маневров.

Тягово – динамические свойства и энергетические характеристики РТС ПК при движении на сложном рельефе с различной несущей способностью грунта могут быть определены методами компьютерного моделирования. Часть новых проектных решений нуждается в экспериментальном подтверждении.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Маленков М.И., Волов В.А., Гусева Н.К., Лазарев Е.А.* Анализ подвижности марсоходов для разработки систем передвижения и алгоритмов управления планетоходами нового поколения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 82-95.
2. *Vogachev A., Kuzmenko D., Lazarev E.* The Use of Walking Mechanisms as an Adaptive Suspension of a Planet Rover // Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium. – 2015. – P. 0989-0996.
3. \**Анисов К.А., Мастаков В.И., Иванов О.Г. и др.* Устройство и работа станции Луна 17 и Лунохода-1. В кн.: Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1. Т. 1. / под ред А.П. Виноградова. – М.: Наука, 1971. – С. 7-20.
4. \**Леонovich А.К., Громов В.В., Рыбаков А.В. и др.* Исследование механических свойств лунного грунта на самоходном аппарате Луноход-1. В кн.: Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1. Т. 1 / под ред. А.П. Виноградова. – М.: Наука, 1971. – С. 77-88.
5. \**Авотинши Е.В., Бородачев Б.В., Исаков М.И. и др.* Исследование работоспособности самоходного шасси на Луне. В кн.: Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1. Т. 2 / ред. Барсуков В.Л. – М.: Наука, 1978. – С. 25-43.
6. *Кемурджиан А.Л., Громов В.В., Черкасов И.И. Шварев В.В.* Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны. – М.: Машиностроение, 1976. – 199 с.
7. *Keturdjian A.L., Gromov V.V., Kazhakalo I.F. et al.* Soviet Developments of Planet Rovers in Period of 1964 – 1990 // Proc. of first Int. Symposium Planet rovers: Purpose, Technology and Design. Toulouse, France. 28–30 september 1992.
8. *Кемурджиан А.Л., Громов В.В., Кажукало И.Ф. и др.* Ходовые испытания планетоходов // Планетоходы / под ред. А.Л. Кемурджиана. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – С. 294-331.
9. *Winnendael M.W., Kucherenko V., Malenkov M. et al.* The Lunar Rover Mockup of ESTEC'S Planetary Utilization Testbed // Proc. of the 5<sup>th</sup> ESA Workshop on ASTRA'98. Noordwijk, The Netherlands, 1998.
10. *Маленков М.И., В.В. Степанов.* Российские технологии при создании систем передвижения планетоходов // Пятьдесят лет космических исследований. – М.: Физматлит, 2009. – С. 250-264.
11. *Alexander Kemurdjian.* From the Moon Rover to the Mars Rover // The Planetary Report, CA, Pasadena. – 1990. – Vol. X, No. 4. – P. 4-11.

12. Volov V., Koutcherenko V., Malenkov M. et al. Development of Autonomous Mars Rover within the framework of international INTAS-CNES project // Proc. of the Int. Conf. "Space 02 and Robotics 02", Albuquerque, USA, 17-21 March 2002. – P. 442-448. Doi: [http://dx.doi.org/10.1061/40625\(203\)53](http://dx.doi.org/10.1061/40625(203)53).
13. Grotzinger J.P., Vasavada A., and Russell C (eds.). Mars Science Laboratory Mission. – Springer, London, 2013. – 763 p.
14. MSL Curiosity Rover. – <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/> (дата обращения 20.01.2017).
15. Mars Exploration Rover. – <http://mars.nasa.gov/mer/mission/status.html> (дата обращения 20.01.2017).
16. Кажукало И.Ф., Мишкинюк В.К. Основные способы передвижения и движители планетоходов // Планетоходы / ред. Кемурджиан А.Л. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 84-107.
17. Кажукало И.Ф. Колесно-шагающий движитель как средство повышения проходимости // Передвижение по грунтам Луны и планет / ред. Кемурджиан А.Л. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 141-185.
18. Маленков М.И., Кажукало И.Ф., Кемурджиан А.Л. Математическое моделирование и ходовые испытания макетов планетоходов // Передвижение по грунтам Луны и планет / ред. Кемурджиан А.Л. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 186-261.
19. Malenkov M.I., Volov V.A., Guseva N.K., Lazarev E.A. Increasing the Mobility of Mars Rovers by Improving the Locomotion Systems and Their Control Algorithms // Russian Engineering Research. Allerton Press, Inc. – 2015. – Vol. 35, No. 11. – P. 824-831. Doi: 10.3103/S1068798X1511012X.
20. Маленков М.И., Волов В.А. Сравнительный анализ компонентов ходовой части самоходных шасси планетоходов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 1. – С. 169-185.
21. Malenkov M.I., Volov V.A., Lazarev E.A. Quality of the Locomotion System in Planetary Rovers // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36, No. 10. – P. 800-808.
22. Fedorushkov A., Kuzmenko D., Lazarev E. Selection of Concept and Determination of the Main Parameters for Manipulator of Dual-Arm Manipulator System of Planetary Rover // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – November 2015. – Vol. 10, No. 20.

## REFERENCES

1. Malenkov M.I., Volov V.A., Guseva N.K., Lazarev E.A. Analiz podvizhnosti marsokhodov dlya razrabotki sistem peredvizheniya i algoritmov upravleniya planetokhodami novogo pokoleniya [Analysis of the mobility of the Mars rovers for the development of the locomotion systems and control algorithms of the planet rovers of new generation], *Izvestiya YuFU. Tehnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 1 (162), pp. 82-95.
2. Bogachev A., Kuzmenko D., Lazarev E. The Use of Walking Mechanisms as an Adaptive Suspension of a Planet Rover, *Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium*, 2015, pp. 0989-0996.
3. \*Anisov K.A., Mastakov V.I., Ivanov O.G. et al. Ustroystvo i rabota stantsii Luna 17 i Lunokhoda-1 [Construction and operation of the station Luna 17 and Lunokhod-1]. In book: *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune Lunokhod-1* [Mobile laboratory on the moon Lunokhod-1]. Vol. 1. Editor A.P. Vinogradov. Moscow: Nauka, 1971, pp. 7-20.
4. \*Leonovich A.K., Gromov V.V., Ribakov A.V. et al. Issledovanie mehanicheskikh svoystv lunnogo grunta na samokhodnom apparate Lunokhod-1 [Investigation of the mechanical properties of the Moon soil at the Lunokhod-1]. In book: *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune Lunokhod-1* [Mobile laboratory on the moon Lunokhod-1]. Vol. 1. Editor A.P. Vinogradov. Moscow: Nauka, 1971, pp. 77-88.
5. \*Avotins E.V., Borodachev B.V., Isakov M.I. et al. Issledovanie rabotosposobnosti samokhodnogo shassi na Lune [Research performance self-propelled chassis on the Moon]. In book: *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune Lunokhod-1* [Mobile laboratory on the moon Lunokhod-1]. Vol. 2. Editor Barsukov V.L. Moscow: Nauka, 1978, pp. 25-43.
6. Kемурджиан А.Л., Громов В.В., Чыеркасов И.И. Шварыев В.В. Автоматические станции для изучения поверхности покрова Луны [Automatic stations for the Moon surface layer exploration]. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 199 p.
7. Kемурджиан А.Л., Громов В.В., Кажукало И.Ф. et al. Soviet Developments of Planet Rovers in Period of 1964 – 1990, *Proc. of first International Symposium Planet rovers: Purpose, Technology and Design. Toulouse, France. 28 – 30 September 1992.*

8. *Kemurdzjian A.L., Gromov V.V., Kazhukalo I.F. et al.* Hodovie ispitaniya planetokhodov [Running tests of the planet rovers], *Planetokhody* [The planet rovers]. 2nd ed., Moscow: Mashinostroenie, 1993m pp. 294-331.
9. *Winnendael, V.I. Kucherenko, M.I. Malenkov et al.* The Lunar Rover Mockup of ESTEC'S Planetary Utilization Testbed. M.W., *Proc. of the 5<sup>th</sup> ESA Workshop on ASTRA '98. Noordwijk, The Netherlands, 1998.*
10. *Malenkov M.I., Stepanov V.V.* Rossiyskie tekhnologii pri sozdaniі sistem peredvizheniya planetokhodov [Russian technologies for the development of the locomotion systems of the planet rovers], *Pyat'desyat let kosmicheskikh issledovaniy* [Fifty years of space research]. Moscow: Fizmatlit, 2009, pp. 250-264.
11. *Alexander Kemurdjian.* From the Moon Rover to the Mars Rover, *The Planetary Report, CA, Pasadena, 1990, Vol. X, No. 4, pp. 4 – 11.*
12. *Volov V., Koutcherenko V., Malenkov M. et al.* Development of Autonomous Mars Rover within the framework of international INTAS-CNES project, *Proc. of the Int. Conf. "Space 02 and Robotics 02", Albuquerque, USA, 17-21 March 2002, pp. 442-448.* Doi: [http://dx.doi.org/10.1061/40625\(203\)53/](http://dx.doi.org/10.1061/40625(203)53/).
13. *Grotzinger J.P., Vasavada, A., and Russell C (eds.).* Mars Science Laboratory Mission. Springer, London, 2013, 763 p.
14. MSL Curiosity Rover. Available at: <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/> (accessed 20 January 2017).
15. Mars Exploration Rover. Available at: <http://mars.nasa.gov/mer/mission/status.html> (accessed 20 January 2017).
16. *Kazhukalo I.F., Mishkinyuk V.K.* Kolyesno-shagayushshiy dvizhityel' [Wheel-walking propulsor], *Planetokhody* [The planet rovers]. Editor Kemurdjian A.L. Moscow: Mashinostroenie, 1982, pp. 84-107.
17. *Kazhukalo I.F.* Kolyesno-shagayushshiy dvizhityel' kak sredstvo povysheniya prokhozimosti [Wheel-walking propulsor, as a means to improve cross], *Peredvizhenie po gruntam Luny i planet* [The movement of the soils of the Moon and planets]. Editor Kemurdjian A.L. Moscow: Mashinostroenie, 1986, pp. 141-185.
18. *Malenkov M.I., Kazhukalo I.F., Kemurdjian A.L.* Matematicheskoe modelirovanie i khodovye ispytaniya planetokhodov. [Mathematic Simulation and running Tests of the Planet Rovers], *Peredvizhenie po gruntam Luny i planet* [The movement of the soils of the Moon and planets]. Editor Kemurdjian A.L. Moscow: Mashinostroenie, 1986, pp. 186-261.
19. *Malenkov M.I., Volov V.A., Guseva N.K., Lazarev E.A.* Increasing the Mobility of Mars Rovers by Improving the Locomotion Systems and Their Control Algorithms, *Russian Engineering Research*, 2015, Vol. 35, No. 11, pp. 824-831.
20. *Malenkov M.I., Volov V.A.* Sravnitel'nyy analiz komponentov hodovoy chasti samokhodnykh shassi planetokhodov [Comparative analysis of the running gear components of the planet rover locomotion systems], *Izvestiya YuFU, Tehnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 1 (174), pp. 169-185.
21. *Malenkov M.I., Volov V.A., Lazarev E.A.* Quality of the Locomotion System in Planetary Rovers // *Russian Engineering Research*, 2016, Vol. 36, No. 10, pp. 800-808.
22. *Fedorushkov A., Kuzmenko D., Lazarev E.* Selection of Concept and Determination of the Main Parameters for Manipulator of Dual-Arm Manipulator System of Planetary Rover, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, November 2015, Vol. 10, No. 20.

\*Под псевдонимами

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Тимофеев.

**Маленков Михаил Иванович** – АО НТЦ «РОКАД»; e-mail: [m.i.malenkov@gmail.com](mailto:m.i.malenkov@gmail.com); 196084, Санкт-Петербург, ул. Ломаная, 11; тел.: +78123656044; г.н.с.; д.т.н.; профессор.

**Богачев Алексей Николаевич** – e-mail: [bogachev\\_an@rocad.ru](mailto:bogachev_an@rocad.ru); начальник отдела.

**Гусева Наталья Константиновна** – e-mail: [guseva\\_nk@rocad.ru](mailto:guseva_nk@rocad.ru); генеральный директор.

**Конколович Андрей Георгиевич** – ведущий инженер-конструктор.

**Кузьменко Дмитрий Николаевич** – e-mail: [kuzmenko\\_dn@rocad.ru](mailto:kuzmenko_dn@rocad.ru); инженер-конструктор.

**Курдзюк Вячеслав Михайлович** – e-mail: kurdzyuk\_vm@rocad.ru; начальник отдела.

**Лазарев Евгений Алексеевич** – e-mail: lazarev\_ea@rocad.ru; технический директор.

**Федорушков Александр Борисович** – e-mail: fedorushkov\_ab@rocad.ru; инженер-конструктор.

**Федорушков Дмитрий Борисович** – e-mail: fedorushkov\_db@rocad.ru; инженер-конструктор.

**Волов Валерий Анатольевич** – ООО «АКТРОН»; 198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная, 2; ведущий научный сотрудник; к.т.н.

**Malenkov Mikhail Ivanovich** – JSC STC «ROCAD»; e-mail: m.i.malenkov@gmail.com; 11, Lomanaya street, Saint-Petersburg, 196084, Russia; phone: +78123656044; chief researcher; dr. of eng. sc.; professor.

**Bogachev Aleksey Nikolaevich** – e-mail: bogachev\_an@rocad.ru; department head.

**Guseva Natalia Konstantinovna** – e-mail: guseva\_nk@rocad.ru; phone: +78123656044; director general.

**Konkolovich Andrey Georgievich** – leading engineer-designer.

**Kuzmenko Dmitriy Nikolaevich** – e-mail: kuzmenko\_dn@rocad.ru; engineer-designer.

**Kurdzyuk Vyacheslav Mikhailovich** – e-mail: kurdzyuk\_vm@rocad.ru; department head.

**Lazarev Evgeniy Alekseevich** – e-mail: lazarev\_ea@rocad.ru; technical director.

**Fedorushkov Aleksandr Borisovich** – e-mail: fedorushkov\_ab@rocad.ru; engineer-designer.

**Fedorushkov Dmitriy Borisovich** – e-mail: fedorushkov\_db@rocad.ru; engineer-designer.

**Volov Valeriy Anatol'yevich** – «ACTRON» Co Ltd; 2, Zarechnaya street, Saint-Petersburg, 198323, Russia; leading researcher; cand. of eng. sc.