

УДК 629.33.03-83

М.И. Маленков, В.А. Волов, Н.К. Гусева, Е.А. Лазарев**АНАЛИЗ ПОДВИЖНОСТИ МАРСОХОДОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАНЕТОХОДАМИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ***

Цель исследований, отраженных в настоящей статье – освоение положительного опыта эксплуатации американских марсоходов, анализ причин, а также способов устранения выявленных недостатков и выбор перспективных направлений проектирования и алгоритмов управления планетоходами нового поколения. Марсоходы Spirit и Opportunity, доставленные на Марс в 2004 году, а также марсоход Curiosity, начавший работу в 2012 году, задали очень высокую планку совершенства для всех последующих марсианских экспедиций в части ресурса работы, живучести, характеристик систем технического зрения, навигации, телекоммуникаций, обеспечения теплового режима, а также в части уровня отработки аппаратной и программной частей системы управления. Однако не может служить хорошим примером подвижность этих мобильных аппаратов, характеристиками которой являются средняя скорость движения, и параметры преодолеваемых без маневрирования препятствий – высота ступенек и камней, угол подъема местности и несущая способность рыхлых грунтов. Обобщенной характеристикой подвижности считается время, затраченное на движение из пункта А в пункт В в границах заданного района неподготовленной местности. Чем сложнее трасса и чем меньше установленная скорость движения, тем более существенное влияние на подвижность оказывает проходимость планетохода и уровень его адаптации к рельефу, и свойствам грунта. Одним из возможных направлений повышения проходимости является применение комбинированных движителей с адаптивными подвесками. Это позволяет совместить в одном самоходном шасси несколько различных способов движения и способов адаптации движителя к поверхности. При включении в контур навигации датчиков прогнозирования потребных показателей опорной и профильной проходимости, появляется возможность разработать оптимальные алгоритмы управления сменой способов, режимов и направления движения. Разработка и проектная реализация новых технических решений позволит обеспечить качественно иной, более высокий уровень подвижности планетоходов.

Марсоход; движитель; алгоритмы управления; механизм шагания; адаптивная подвеска; система передвижения; подвижность; проходимость.

M.I. Malenkov, V.A. Volov, N.K. Guseva, E.A. Lazarev**EVALUATION MARS ROVERS MOVABILITY FOR THE PURPOSE OF DEVELOPMENT OF LOCOMOTION SYSTEMS AND ALGORITHMS OF CONTROL OF NEW GENERATION PLANET ROVERS**

The purpose of research represented in the current article is studying of the American mars-rover exploitation successful experience, analyzing of reasons and ways of correction of the detected faults, as well as the choice of the upcoming trends in designing and algorithms of control of the new generation planet rovers. Spirit and Opportunity mars-rovers, which were delivered to Mars in 2004, and Curiosity mars-rover, that began operating in 2012, set the very high standard of perfection for all further Martian expeditions in terms of operational life, durability, characteristics of vision system, navigation, telecommunications, thermal conditions control as well as operating level of the mechanism and program parts of the control systems. Although the mobility of these vehicles, characterized by the average speed and parameters of the overcome (without maneuvering) obstacles, which are the height of steps and rocks, angle of climb of terrain, minimal value of the bearing capacity of soil on which the mars-rover can realize its movement function, cannot be taken as a good example. The time spent on traveling from point A to point B within the

* Прикладные научные исследования проводятся при поддержке Минобрнауки России в рамках проекта № 14.576.21.0050.

limits of the specified area is taken as a generalized characteristic. The more difficult is the route and the less is the set speed, the more significant is the influence on the movability of a planet rover and the degree of adaptation to the terrain as well as physical and mechanical properties of the soil. One of possible ways to improve the movability of the vehicle is using of combined propulsions integrated with adaptive suspensions. This makes it possible to combine several different ways of movement and adaptation of the propulsion to the surface in one self-propelled chassis. If sensors of forecasting of required values of cross-country ability and floatation are included in the navigation contour, optimal algorithms of change of the ways, regimes and directions of movement can be designed. Development and project implementation of the new technical solutions will let to provide fundamentally different, much higher degree of the planet rovers movability.

Mars rover; propulsion device; control algorithms; walking mechanism; adaptive suspension; locomotion system; movability; passableness.

Введение. В докладе изложены некоторые материалы прикладных научных исследований, выполненных на этапе 1 проекта Минобрнауки.

Цель статьи совпадает с целью этого этапа: обоснование и выбор направлений исследований в процессе анализа существующих и разработке новых проектно-компоновочных решений мобильной робототехнической системы для ее применения в составе планетных миссий

Методы проведения прикладных научных исследований основаны на развитии технических решений отечественной школы транспортного космического машиностроения, созданной профессором А.Л.Кемурджианом – главным конструктором самоходных автоматических шасси «Лунохода-1» и «Лунохода-2». В традициях этой школы – поиск способов повышения проходимости систем передвижения (СП) планетоходов при движении по неподготовленной местности с учетом рельефа и физико-механических свойств (ФМС) грунта, а также с учетом ограничений, свойственных космическим аппаратам (КА) [1, 2, 3].

Традиционный, геометрический способ повышения проходимости колесных транспортных средств, для планетоходов ограничен габаритами перелетных модулей. Одним из приемов увеличения диаметра колес при ограниченных транспортных габаритах является применение развертываемых колес до диаметра 1...1,5 м. Наиболее перспективным может считаться способ разворачивания колес путем их быстрого наддува с помощью газогенераторов, применяемых для систем посадки КА. Однако он требует освоения новых технологий изготовления колес и их сопряжения с приводами и арматурой регулирования давления в шинах [4].

Другие возможные направления повышения проходимости, связанные с применением двух и более секционных шасси, гибких рам [5] ниже не рассматриваются, несмотря на то, что в этом направлении были достигнуты очень высокие показатели проходимости [6, 7, 8, 9]. Такая концепция вызывает необходимость секционирования контейнеров с их сложными системами обеспечения микроклимата для электронной аппаратуры, что нежелательно.

В настоящей статье рассматривается иное направление повышения проходимости – применение комбинированных колесно-шагающих движителей (КШД). Применительно к планетоходам, это направление родилось в нашей стране. Еще в прошлом веке во ВНИИТрансмаш были разработаны теоретические основы колесно-шагающего способа передвижения, синтезированы некоторые механизмы и приводы колесного шагания [10, 11].

Затем были созданы несколько полноразмерных ходовых макетов планетоходов с различными типами походок, конструкцией механизмов шагания и схемами приводов которые выдержали испытания на сложном рельефе в районах рыхлых отложений вулканических песков на Камчатке [12]. Это колесно-шагающий макет (КШМ) с непрерывными походками, на базе мотор-колес советских луноходов и экспериментальный образец самоходного шасси (ЭО САШ), марсохода, реализующий различные прерывные походки (рис. 1).

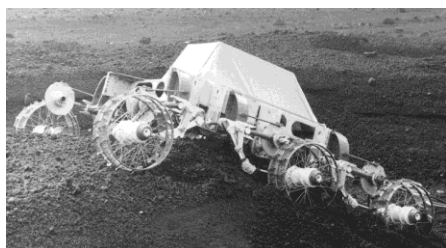


Рис. 1. Фрагменты испытаний ходовых макетов с КШД: КШМ (слева, режим колесного шагания), ЭО САШ (колесный режим с адаптацией)

Дальнейшее развитие идеи колесного шагания возможно в направлении расширения функций механизмов шагания, повышения уровня адаптации движителя к рельефу. При этом нужно учитывать богатый опыт создания и эксплуатации реальных марсоходов.

Особенности конструкции ходовой части и навигации американских марсоходов. Реальные американские марсоходы XXI века продемонстрировали недостижимые прежде показатели в части ресурса работы и живучести бортовой аппаратуры. 6 лет отработал на Марсе Spirit, а его близнец Opportunity работает уже 11 лет. Получен огромный объем научной информации, над осмыслением которой в разных странах, включая Россию, работают тысячи ученых [13, 14].

Самые современные технологии обеспечили высокие характеристики систем технического зрения, навигации, телекоммуникаций, обеспечения теплого режима, высокий уровень отработки аппаратной и программной частей системы управления марсоходами. Новые возможности колонизации Марса открывает получившийся сразу, без «примерок», в реальных условиях, способ посадки марсохода Curiosity с помощью «небесного крана» [15].

Однако подвижность систем передвижения марсоходов, на наш взгляд, не соответствует современным технологическим возможностям. Для понимания имеющихся в этой части проблем необходим анализ особенностей конструкции самоходного шасси, особенностей управления движением в критичных по сохранению подвижности ситуациях на трассе.

Несмотря на существенное различие в габаритах и полной массе (Sojourner – 15,6 кг, «близнец» Spirit и Opportunity – примерно по 185 кг, Curiosity – 899 кг), самоходные шасси всех четырех американских марсоходов базируются на применении унифицированных технических решений. Это логично, ведь эти решения разрабатывались в одном научно-исследовательском центре – Jet Propulsion Laboratory (JPL).

Единый подход, в частности, виден в выборе геометрических характеристик и конструкции колеса. Они имеют малый, по сравнению с колесами американских и советских луноходов, диаметр, жесткий практически сплошной обод с едва выступающими грунтозацепами (рис. 2). Самые малые колеса (Sojourner) – цилиндрические, с грунтозацепами в виде шипов. «Близнецы» снабжены некруглыми колесами с приливом в форме местного утолщения наружного обода, которое не попадает в объектив фото. На остальной поверхности этих колес и на всей поверхности колес Curiosity, образующая цилиндра наружного обода представляет собой отрезок дуги большого диаметра.

Все четыре марсохода снабжены балансирными (качающимися, неупругими) подвесками типа Rocker Bogie [16], которые предусматривают шестиколесное шасси и межбортовую связь основных бортовых балансиров с помощью шарнирно-рычажного механизма (Sojourner и Curiosity) или дифференциала (Spirit и Opportunity). Один из концов каждого балансира связан с мотор – колесом, а второй шарнирно связан с дополнительным балансиром, объединяющем два других мотор – колеса в составе тележки.



Рис. 2. Колеса американских марсоходов диаметром (слева направо): 0,13 м; 0,26 м и 0,50 м

Несомненные достоинства этих подвесок – контакт (в большинстве ситуаций на трассе) всех шести колес с опорной поверхностью, уменьшение угла наклона корпуса в два раза при переезде препятствий одним бортом и возможность значительного уменьшения или даже исключения этого угла при преодолении случайных одиночных препятствий одновременно двумя бортами. Но эти подвески не лишены существенных недостатков.

Так, автоматическое разворачивание ходовой части «близнецов» из транспортного положения в рабочее обеспечивается с помощью специального домкрата, который не участвует в организации движения. Для разворачивания необходимы по два дополнительных привода на балансирную подвеску каждого борта, которые также не используются при движении. По приблизительным оценкам суммарная масса всех механизмов одноразового действия, необходимых только для разворачивания ходовой части, может составлять около 5–7 % от полной массы марсохода Opportunity. Это ощутимый балласт экспедиции.

Сюда, естественно, не входит масса рулевых механизмов крайних колес, которые участвуют в процессе разворачивания ходовой части марсохода Curiosity. Средние колеса всех марсоходов не поворотные, что исключает движение вбок, под углом $\pm 45^\circ$ к продольной оси симметрии шасси.

К числу недостатков нужно отнести неблагоприятное распределение нормальных реакций по колесам одного борта шасси при преодолении крутых подъемов. Расчеты показывают, например, что при движении на подъем $\alpha = 25^\circ$ передним ходом (тележки сзади) с коэффициентом сопротивления движению $f = 0,12$, нормальные реакции кормовых колес шасси, оснащенного подвесками типа Rocker Bogie, примерно в 4 раза больше реакций, действующих на среднее и переднее колеса.

При движении задним ходом (тележки впереди) различие реакций уменьшается, подвеска работает более эффективно, однако выбор характеристик тягового привода необходимо проводить для наиболее тяжелого режима работы. Поэтому разработчики вынуждены идти на применение тяговых электродвигателей излишней мощности и массы, ведь все мотор-колеса полностью идентичны. Это общий

недостаток не адаптивных (и балансирных, и упругих) подвесок многоприводных машин, который может быть в той или иной мере нивелирован путем регулирования положения центра масс на продольной оси симметрии.

Еще один недостаток схемы подвески типа *Rocker Bogie* – возможность в некоторых ситуациях отрыва средних или крайних колес от грунта, что может привести к четырехколесной схеме, когда транспортное средство, естественно, утрачивает преимущества колесной формулы 6х6.

В целом, можно констатировать, что по своей конструкции и характеристикам ходовая часть всех американских марсоходов не рассчитана на преодоление участков трассы с рыхлым грунтом. А такие участки, как показали результаты эксплуатации, не редкость на Марсе благодаря наличию очень мелких частиц грунта (10 микрон и менее) и наличию атмосферы.

Расположение опасных участков может изменяться во время глобальных пылевых бурь. Они могут соседствовать с большими территориями, поверхностный покров которых представляет надежную опору для движения. Важно отметить также, что участки с рыхлым, слабосвязным грунтом нередко по внешнему виду не отличаются от участков с достаточно прочным грунтом. Как заметили исследователи, нередко тонкозернистый пылеватый материал сверху перекрыт тонким (1–3 мм) слоем с миллиметровыми зёрнами, которые бронируют нижележащий тонкозернистый материал, но легко разрушаются под нагрузкой [17].

Это обстоятельство не позволяет считать достаточным состав и некоторые характеристики информационно – управляющей системы вождения американских марсоходов, базирующейся исключительно на визуальных методах навигации и обеспечения безопасности. *Spirit* и *Opportunity*, например, имеют по две курсовые камеры на носу (*front Hazcam*) и корме (*rear Hazcam*), предназначенные для распознавания препятствий, и пару обзорных навигационных камер (*Navcam*), с помощью которых моделируется поверхность, решаются задачи локализации на местности и прокладывается маршрут с учетом стратегических задач и обнаруженных непреодолимых препятствий.

Из некоторых описаний можно понять, что эти же камеры используются для дискретного расчета фактически пройденного пути. Однако информацию о величине буксования ходовых колес необходимо обрабатывать на борту в непрерывном режиме. Тогда автоматический алгоритм управления может обеспечить своевременную остановку и отъезд марсохода от опасной зоны. Как этот процесс организован в действительности нам не известно, но каждый раз марсоход останавливался в результате зарывания колес в грунт.

Помимо шести черно-белых камер, непосредственно входящих в контур автоматического вождения, для выбора стратегического направления движения и мест остановки для исследований используются также мультиспектральные видеосистемы высокого разрешения, установленные на борту орбитальных аппаратов и бортовая стереопара обзорных камер (*Rancam*).

Curiosity имеет 5 пар монохромных камер высокого разрешения, входящих в контур автоматического управления: одну обзорную с углом 45° и по две неповоротные пары, размещенные по бортам. Обзорная пара, размещенная на одной площадке с инерциальным измерительным устройством, позволяет получать 3D изображения местности и видеть объект размером 2 сантиметра с расстояния 25 метров.

Но на борту марсоходов нет ни одного прибора даже для грубой оценки физико-механических свойств или прочности грунта по маршруту движения. Оценка ФМС была сделана американскими специалистами косвенными методами: по глубине колеи, которая равна деформации грунта под нагрузкой. В частности, в кратере Гусева, который исследовал марсоход *Spirit*, диапазон несущей способности

слабосвязных грунтов на различных участках составил от 5 кПа до 200 кПа. При этом внутреннее сцепление и угол внутреннего трения грунта исследователи оценили такими величинами: при нижнем значении 1 кПа и 20° , при верхнем – соответственно 15 кПа и 25° [18].

Хроника критичных ситуаций на трассе движения Opportunity. За годы своей эксплуатации Opportunity всего несколько раз попадал в критичную ситуацию. Но первые проблемы начались сразу после успешной посадки 25.01.2004 на дно небольшого кратера Игл диаметром примерно 20 м и глубиной 2–3 м. Несмотря на сравнительно небольшой угол стенок кратера (примерно $12\text{--}17^\circ$), первые попытки выезда по направлению на угол наибольшего подъема закончились неудачей. Выехать удалось только «косогором» (рис. 3).

Во второй раз проблемы с подвижностью возникли через год, в апреле 2005 г., после отказа рулевого привода переднего правого колеса, который замер в положении примерно 8° к продольной оси. Для повышения шансов сохранить подвижность, марсоход развернули и стали двигаться задним ходом. Но 26 апреля 2005 г. марсоход застрял в песчаной дюне высотой примерно 0,35 м. Угол подъема при этом составил величину не более 12° .

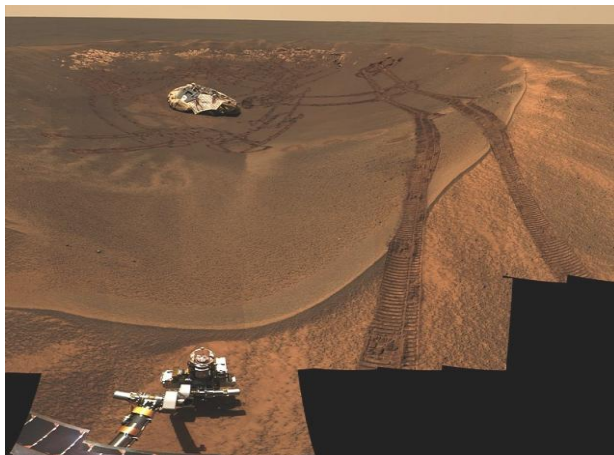


Рис. 3. Выезд Opportunity из кратера Игл

Поскольку передние (по ходу движения) колеса зарылись полностью в грунт, а задние – по ступицу было принято решение выезжать назад, то есть вновь двигаться основным, передним ходом. Выезд на прочный грунт состоялся только 6 июня 2005 г. в результате многочисленных локальных движений. Прогресс виден на кадрах курсовых камер (рис. 4), где зафиксирована ситуация начала выезда. Видно, что обод залеплен грунтом и не очищается при движении, грунтозацепы не работают.

В итоге этого эпизода марсоход прошел всего несколько метров, тогда как теоретически, по оборотам колес, он должен был проехать 190 м. Следовательно, буксование достигало фантастических значений 95–98 %, но аппарат все-таки выехал! Это была не просто удача, аппарат показал свои предельные кондиции, но считать такое движение нормой, конечно, нельзя.

Следующий раз марсоход попал в песчаную ловушку 30 мая 2006 года. Видимо благодаря накопленному опыту вождения на этот раз ее удалось покинуть через несколько дней. Нужно отметить, что причины неудач заключались именно в свойствах грунта. В кратере Викториа марсоход поднимался по стенкам с обна-

женными коренными породами, без следов эоловых отложений, на подъемы до 25° . Но 12 апреля 2008 года в том же кратере, но на песчаных отложениях буксование колес превысило допустимые значения даже при спуске аппарата.

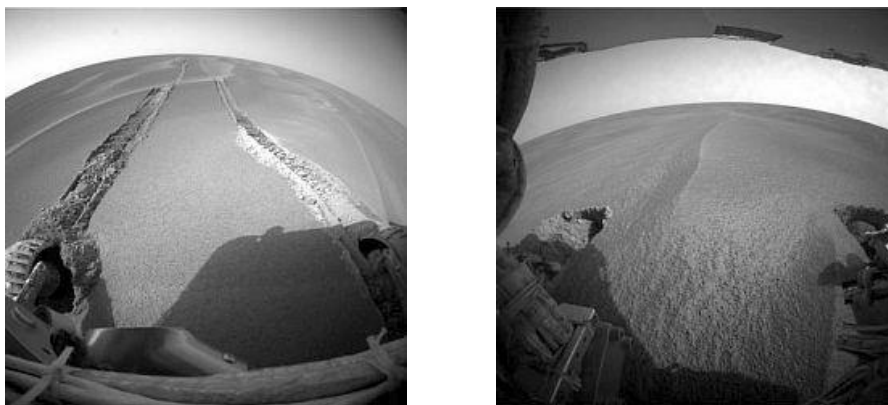


Рис. 4. Потеря подвижности Opportunity на песчаной дюне высотой 0,35 м: слева задние (по ходу движения до застревания) колеса, справа – передние

Угрозы потери подвижности в результате сильного буксования возникали еще и в 2009, и в 2010 годах. Для повышения безопасности трассу движения от кратера Виктория к кратеру Индовер проложили с объездом опасных участков, определенных по съемкам местности с орбиты. Помимо этого, пришлось объезжать еще несколько подозрительных участков, обнаруженных по месту. В результате вместо 17 км по кратчайшему пути пришлось преодолеть примерно 26 км, а общее время перехода составило 3 земных года, вместо предполагавшихся 2-х лет.

Аналогичные проблемы марсохода Spirit описаны в [19, 20].

Разработчики будущих марсоходов имеют шанс сделать выводы из уникального опыта американских специалистов. На наш взгляд, эти выводы должны относиться и к ходовой части, и к информационно-управляющей подсистеме автоматического вождения. Ходовая часть должна быть способна адаптироваться к слабо-связному грунту в критических ситуациях.

Информационно-управляющая подсистема должна быстро реагировать на увеличение буксования и иметь в своем составе простой по конструкции пенетрометр - прибор для оценки прочности грунта контактными методами, для своевременного реагирования на опасные изменения механических свойств грунта.

Поисковые разработки нового технического облика планетохода в рамках проекта Минобрнауки. Главным критерием при анализе существующих, и выборе направлений разработки новых систем передвижения принята подвижность планетоходов. Обобщенной характеристикой подвижности считается время, затраченное на движение из пункта А в пункт В в границах заданного района неподготовленной местности. Чем сложнее трасса и чем меньше установленная скорость движения, тем более существенное влияние на подвижность оказывает проходимость планетохода и уровень его адаптации к опорной поверхности.

При разработке проекта учитываются современные технологии и требования к экспедициям на Луну и Марс [21–26], а также результаты новых исследований зарубежных специалистов в части адаптивных систем передвижения высокой проходимости [27, 28]. Они показывают, что идеи колесного шагания и адаптивных подвесок в новом веке переживают второе рождение и подчас выходят за рамки чисто познавательных проектов на уровень демонстраторов и промышленных изделий.

Так, шасси Hyllos II (рис. 5) массой 12 кг разработан как исследовательская система для отработки алгоритмов управления в Laboratoire de Robotique de Paris – University de Paris [29].

Самоходное шасси робота WorkPartner, разработано RCL Co. Ltd (дочернее предприятие ВНИИТрансмаш), по заказу Helsinki University of Technology, что получило отражение в профессиональном дизайне (рис. 5) [30]. Полная масса этого робота 200 кг. После нескольких лет настойчивого совершенствования аппаратной и программной частей информационно-управляющей системы он демонстрирует на публике различные способы адаптации к опорной поверхности в колесном и колесно-шагающем режимах при различных способах управления.



Рис. 5. Четырех опорные шасси с колесно-шагающим движителем: Hyllos II (слева) и WorkPartner

Оба этих робота имеют схожую кинематику подвески с двумя степенями свободы для каждой ноги, в качестве приводов механизма шагания используются линейные электроприводы. Hyllos II осуществляет поворот с помощью четырех поворотных колес, имея в сумме шестнадцать управляемых степеней подвижности. В шасси WorkPartner для поворота используется управляемый центральный шарнир.

Комбинированный колесно-шагающий движитель выбран для подвижной платформы МАММОТН, разработанного в Австралии применительно к задачам передвижения по Марсу [31]. В JPL при финансировании NASA создан полноразмерный макет шестиногой лунной подвижной платформы Tri-ATHLETE грузоподъемностью 450 кг, способный в колесном режиме движения развить скорость до 2 км/час [32].

В результате расчетно-теоретических и проектно-компоновочных исследований в проекте разработана новая адаптивная система передвижения (рис. 6) с четырьмя идентичными опорно – движительными модулями (ОДМ). Ее колесная формула может быть записана в виде: $4 \times 4 \times 4 + 4 \text{мш}$, где третья цифра указывает количество поворотных колес, а четвертая – количество механизмов шагания (МШ) по числу ОДМ.

Каждый ОДМ включает двух рычажный механизм шагания с независимыми приводами вращения рычагов, колесо со встроенным тяговым приводом (мотор – колесо), ступица которого шарнирно связана со свободным концом второго рычага и рулевой механизм с приводом поворота колеса относительно вертикальной оси. Приводы МШ и тяговый привод снабжены нормально замкнутыми фрикционными тормозами с механизмами их размыкания – замыкания. Общее количество приводов системы передвижения равно шестнадцати.

Применение двух приводов в конструкции механизма шагания каждого колеса значительно расширяет зону перемещения колеса относительно корпуса системы передвижения, что позволяет преодолевать значительные препятствия, прежде всего за счет переноса колес, а не за счет их размеров.

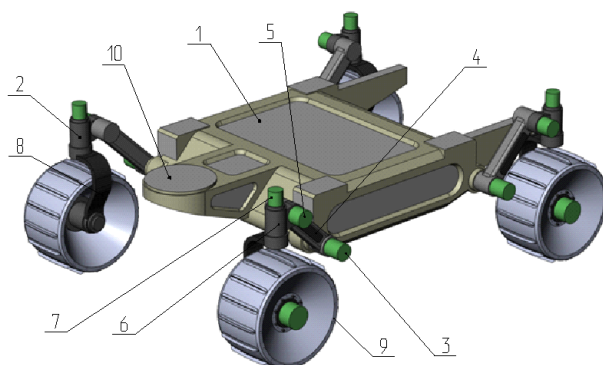


Рис. 6. Проектный облик и состав системы передвижения: 1 – корпус (несущая конструкция); 2 – опорно-двигательный модуль; 3 – привод бедра; 4 – бедро; 5 – привод голени; 6 – голень; 7 – привод поворота колеса; 8 – рычаг с приводом вращения колеса; 9 – колесо; 10 – место установки манипуляционной системы

Размер колес перестает быть определяющим при преодолении препятствий и выбирается, в основном, по условиям движения в наиболее типичных ситуациях. Уменьшение количества и размера колес упрощает систему передвижения и уменьшает удельную долю ходовой части в общей массе системы передвижения, уменьшает ее размеры. Появляется возможность маневрирования на ограниченной площади, без криволинейных траекторий путем разворота колес на один угол и последующего прямолинейного движения. Этот маневр часто определяют как «движение крабом».

На рис. 7 показаны некоторые возможности предложенной СП по организации различных конфигураций и преодолению препятствий.

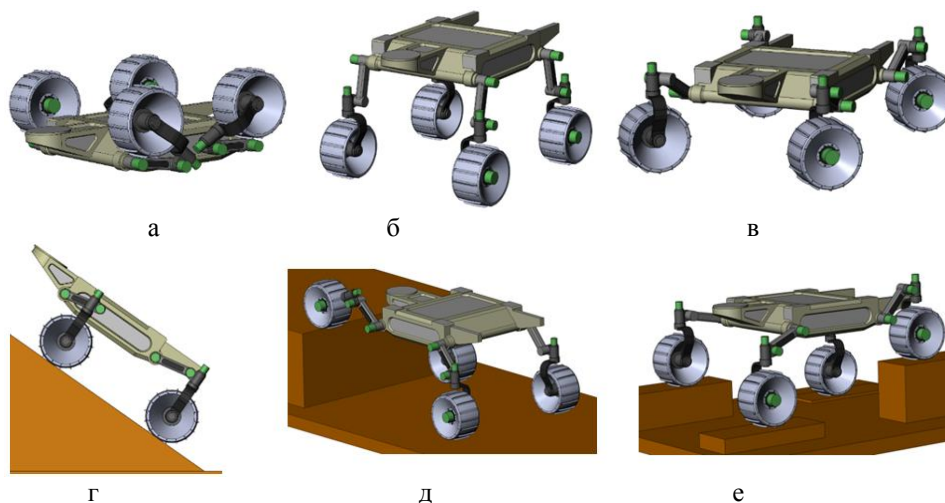


Рис. 7. Конфигурации и преодоление препятствий разрабатываемой СП: а – транспортная конфигурация; б – конфигурация с максимальным клиренсом; в – конфигурация для движения «крабом»; г – преодоление подъема со смещением центра масс вперед; д – преодоление эскарпа двумя бортами одновременно; е – преодоление произвольных препятствий

Встроенные в механизмы датчики информационной подсистемы позволят реализовывать эти и другие конфигурации в режимах автоматического управления по собственным программам. Управление сменой программ, как правило, будет функцией главного компьютера. Но при угрозах безопасности движения: потеря устойчивости от опрокидывания, увеличенное, сверх допустимого буксование, приближение к участкам с недопустимо низкой несущей способностью – решение на остановку будет приниматься в рамках собственного контура управления блока автоматике шасси.

Для этого проект предусматривает оснащение системы передвижения прибором, позволяющим, при опасном увеличении буксования, оценивать механическую прочность грунта перед планетоходом контактными методами с достаточной для безопасности движения дискретностью. Величина буксования будет определяться в реальном времени. Включение в традиционный контур навигации планетохода инструментального прогноза проходимости позволяет разработать оптимальные алгоритмы управления сменой способов, режимов и направления движения.

Таким образом, разработанная система передвижения планетоходов нового поколения обеспечивает реализацию следующих автоматических алгоритмов: развертывание из транспортного положения в рабочее; трансформация шасси для удобства проведения некоторых научных исследований; адаптация подвески к сложному рельефу при движении в колесном режиме; смена колесного режима на колесно – шагающий при угрозе потери подвижности на грунтах с низкой несущей способностью, реализация заданной походки в колесно-шагающем режиме движения.

До завершения проекта остается около двух лет, в течение которых предполагается завершить формирование технического облика планетохода, разработать математические и компьютерные модели и провести с их помощью исследования и отработку алгоритмов автоматического управления, а также тяговых, динамических и энергетических характеристик при движении по различным трассам. При этом внутренние характеристики механизмов опорно-двигательных модулей предполагается определить экспериментально на специально изготовленных макетах. Это повысит достоверность моделирования.

Выводы. Анализ разработок, результатов испытаний и эксплуатации систем передвижения реальных марсоходов, демонстраторов и экспериментальных макетов показывает, с одной стороны, ограничения по проходимости при использовании традиционных технических решений по конструкции колесной ходовой части, а с другой – возможные направления повышения подвижности при движении на неподготовленной местности. В новом проекте разрабатывается одна из возможных модификаций комбинированного колесно-шагающего движителя. Это позволяет в колесном режиме движения использовать механизмы шагания для адаптации к рельефу местности, а адаптацию к грунтам с низкой несущей способностью производить путем перехода в режим колесного шагания.

Предложенные новые технические решения базируются на традициях отечественной школы создания луноходов, интегрируют многолетний опыт проектирования планетоходов, их ходовых макетов, наземных подвижных роботов, в том числе, в рамках международных программ. Они направлены на развитие передовых идей российских разработчиков в этой области, соответствующих мировому уровню.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Передвижная лаборатория на Луне – «Луноход-1» / Под ред. А.П. Виноградова. – М.: Наука, 1971. – Т. 1. – 128 с.
2. Кемурджиан А.Л., Громов В.В., Черкасов И.И., Шварев В.В. Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны. – М.: Машиностроение., 1976. – 200 с.

3. Передвижная лаборатория на Луне – «Луноход-1» / Под ред. В.Л. Барсукова. – М.: Наука, 1978. – Т. II. – 183 с.
4. *Malenkov M., Maurete M., Koutchetenko V. et al.* Innovative Mars exploration rover using inflatable or unfolding wheels // Proc. of the Workshop ASTRA'06, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. – 2006.
5. *Беккер М.Г.* Введение в теорию систем местность-машина: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1973. – С. 402-502.
6. *Keturdjian A.L.* From the Moon Rover to the Mars Rover // The Planetary Report. CA, USA. – 1990. – Vol. X, № 4. – P. 4-11.
7. *Keturdjian A.L. et al.* Small mobile Apparatus for Mars surface studies. // Proc. of the 2nd COSPAR Colloquium in Sopron 22-26 January 1990. Pergomon Press Oxfoad. – New York, 1990. – P. 113-120.
8. *Louis D. Friedman and Thomas Heinsheimer.* Reasons to Be Proud Lessons of the Great Rover Adventure. // The Planetary Report. CA, USA. – 1992. – Vol. XII, № 6. – P. 16-18.
9. *Keturdjian A.L., Gromov V.V., Kazhukalo I.F. et al.* Soviet Development of Planet Rovers in Period 1964-1990. // Proc. first int. Symposium 28-30 September 1992 «Planet Rovers: Purpose, Technology and Design». Toulouse, Fr. – 1992.
10. *Кажукало И.Ф.* Принцип шагания в движителях транспортных машин. Колесно-шагающий движитель // Планетоходы / Под ред. А.Л. Кемурджиана. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 65-107.
11. *Кажукало И.Ф.* Колесно-шагающий движитель, как средство повышения проходимости // Передвижение по грунтам Луны и планет / Под ред. А.Л. Кемурджиана. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 141-185.
12. *Кажукало И.Ф., Маленков М.И., Назаренко Б.П.* Математическое моделирование и ходовые испытания планетоходов // Передвижение по грунтам Луны и планет / Под ред. А.Л. Кемурджиана. – М.: Машиностроение. 1986. – С. 186-261.
13. *Golombek M.P. et al.* Overview of the Mars Pathfinder Mission and Assessment of Landing Site Predictions // Science. – 1997. – Vol. 278. – P. 1743-1748.
14. NASA – Mars Exploration Rover [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nasa.gov/centers/ames/research/exploringtheuniverse/exploringtheuniverse-marsexplorationrovers.html>, свободный (последнее обращение 24.02.2015).
15. MSL Curiosity Rover [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/>, свободный (последнее обращение 24.02.2015).
16. *Brian D. Harrington and Chris Voorhees,* The Challenges of Designing the Rocker-Bogie Suspension for the Mars Exploration Rover [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.researchgate.net/publication/24391914_The_Challenges_of_Designing_the_Rocker-Bogie_Suspension_for_the_Mars_Exploration_Rover, свободный (последнее обращение 24.02.2015).
17. *Herkenhoff K.E. et al.* In situ observations of the physical properties of the Martian surface // The Martian Surface: Composition, Mineralogy, and Physical Properties, ed. J. F. Bell III. Cambridge University Press. – 2008. – P. 451-467.
18. *Arvidson R.E. et al. (28 co-authors).* Localization and Physical Properties Experiments Conducted by Spirit at Gusev Crater // Science. – 2004. – Vol. 305. – P. 821-824.
19. *Лисов И.* Последний парад наступает // Новости космонавтики. – 2010. – № 03. – С. 24-27.
20. *Лисов И.* Последний парад наступает // Новости космонавтики. – 2010. – № 05. – С. 28-33.
21. *Malenkov M.I. et al.* Key technologies of the Moon exploration: realization and perspectives of highly effective locomotion systems for the Moon rovers. // Proc. of the 8th ILEWG Conference on Exploration and Utilization of the Moon. Journal of Astronautics. China. – Beijing: 2007. – Vol. 28. – № 4. – P. 105-114.
22. *Malenkov M.I., Stepanov V.V.* Russian Greating Technologies of Planetary Rover Locomotion Systems // Fifty Years of Space Research. Science. Editor A. Zakharov. – Moscow: Space Research Institute. – 2009. – P. 257-272.
23. *Маленков М.И.* «Создание «Лунохода-1» – выдающееся научно-техническое достижение XX века» // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». – 2011. – № 01. – С. 13-21.
24. *Malenkov M.I.* Creation of Lunokhod-1 as an Outstanding Scientific and Technological Achievement of the XX Century // Solar System Research. – 2013. – Vol. 47, № 7. – P. 610-617

25. *Крайнов А.М., Воронцов В.А., Маленков М.И.* Прогнозирование проектного облика лунохода как элемента космического комплекса отечественной программы исследования Луны // *Материалы XLIX чтений «К.Э. Циолковский и стратегия космонавтики»*. РАН. – Калуга, 2014. – С. 173-174.
26. *Abdulkhalikov R.M. et. al. (97 co-authors).* Manned Mission to Mars. Editor-in-Chief A.S.Koroteyev. Russian Academy of Cosmonautics named K.E. Tsiolkovsky. – Moscow, 2006. – 313 p.
27. *Iagnemma et. al.* Control of robotic vehicles with actively articulated suspensions in rough terrain // *Autonomous Robots*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. – 2003. – № 14. – P. 5-16.
28. *Bartlett P., Wettergreen D., Whittaker W.L.* Design of the Scarab Rover for Mobility and Drilling in the Lunar Cold Traps // *Proc. International Symposium on Artificial Intelligence «Robotics and Automation in Space»*. Los Angeles, USA. February. – 2008.
29. *Ben Amar F. et. al.* Performance evaluation of locomotion modes of an hybrid wheel-legged robot for self-adaptation to ground conditions // *Proc. of the 8th ESA Workshop «ASTRA 2004»*. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, November 2-4. – 2004.
30. *Leppänen I.* Automatic locomotion mode control of wheel-legged robots // *Series A: Research Reports №30, Automation Technology Laboratory, Helsinki University of Technology, Espoo, Helsinki*. – 2007. – 107 p.
31. *Reid W. Goktogan A.H., Sukkarieh S.A.* Highly Mobile Wheel-on-Leg Planetary Rover for use in a Martian Analogue Environment // *Proc. of 13th Australian Space Science Conference*. – 2013. – P. 273-282.
32. ATHLETE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www-robotics.jpl.nasa.gov/systems/system.cfm?System=11>, свободный (дата обращения 27.02.2015).

REFERENCES

1. *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune – «Lunokhod-1»* [A mobile laboratory on the moon – "Lunokhod-1"], Edited by A.P. Vinogradov. Moscow: Nauka, 1971, Vol. 1, 128 p.
2. *Kemurdzhian A.L., Gromov V.V., Cherkasov I.I., Shvarev V.V.* Avtomaticheskie stantsii dlya izucheniya poverkhnostnogo pokrova Luny [Automatic station for exploring the surface of the moon cover]. Moscow: Mashinostroenie., 1976, 200 p.
3. *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune – «Lunokhod-1»* [A mobile laboratory on the moon – "Lunokhod-1"], Edited by A. P. Vinogradov. Moscow: Nauka, 1978, Vol. II, 183 p.
4. *Malenkov M., Maurete M., Koutchetenko V. et. al.* Innovative Mars exploration rover using inflatable or unfolding wheels // *Proc. of the Workshop ASTRA'06, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands*. – 2006.
5. *Bekker M.G.* Vvedenie v teoriyu sistem mestnost'-mashina [Introduction to the theory of systems of terrain-machine]: Translation from English. Moscow: Mashinostroenie, 1973, pp. 402-502.
6. *Kemurdjian A.L.* From the Moon Rover to the Mars Rover, *The Planetary Report. CA, USA*, 1990, Vol. X, No. 4, pp. 4-11.
7. *Kemurdjian A.L. et. al.* Small mobile Apparatus for Mars surface studies, *Proc. of the 2nd COSPAR Colloquium in Sopron 22-26 January 1990. Pergomon Press Oxfoad*. New York, 1990, P. 113-120.
8. *Louis D. Friedman and Thomas Heinsheimer.* Reasons to Be Proud Lessons of the Great Rover Adventure, *The Planetary Report. CA, USA*, 1992, Vol. XII, No. 6, pp. 16-18.
9. *Kemurdjian A.L., Gromov V.V., Kazhukalo I.F. et. al.* Soviet Development of Planet Rovers in Period 1964-1990, *Proc. first int. Symposium 28-30 September 1992 «Planet Rovers: Purpose, Technology and Design»*. Toulouse, Fr., 1992.
10. *Kazhukalo I.F.* Printsip shaganiya v dvizhitelyakh transportnykh mashin. Kolesno-shagayushchiy dvizhitel' [The principle of walking in the propulsion vehicles. Wheel-walking mover], *Planetokhody* [Rovers], Edited by A.L. Kemurdzhiana. Moscow: Mashinostroenie, 1982, pp. 65-107.
11. *Kazhukalo I.F.* Kolesno-shagayushchiy dvizhitel', kak sredstvo povysheniya prokhodimosti [Wheel-walking mover, as a means of increasing the permeability of], *Peredvizhenie po gruntam Luny i planet* [Movement through soil of the moon and planets], Edited by A.L. Kemurdzhiana. Moscow: Mashinostroenie, 1986, pp. 141-185.

12. Kazhukalo I.F., Malenkov M.I., Nazarenko B.P. Matematicheskoe modelirovanie i khodovye ispytaniya planetokhodov [Mathematical modeling and tests of Rover wheels], *Peredvizhenie po gruntam Luny i planet* [Movement through soil of the moon and planets], Edited by A.L. Kemurdzhiana. Moscow: Mashinostroenie, 1986, pp. 186-261.
13. Golombek M.P. et al. Overview of the Mars Pathfinder Mission and Assessment of Landing Site Predictions // *Science*. – 1997. – Vol. 278. – P. 1743-1748.
14. NASA – Mars Exploration Rover. Available at: <http://www.nasa.gov/centers/ames/research/exploringtheuniverse/exploringtheuniverse-marsexplorationrovers.html>. (Accessed 24 February 2015).
15. MSL Curiosity Rover. Available at: <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/>. (Accessed 24 February 2015).
16. Brian D. Harrington and Chris Voorhees, The Challenges of Designing the Rocker-Bogie Suspension for the Mars Exploration Rover. Available at: http://www.researchgate.net/publication/24391914_The_Challenges_of_Designing_the_Rocker-Bogie_Suspension_for_the_Mars_Exploration_Rover, свободный (Accessed 24 February 2015).
17. Herkenhoff K.E. et al. In situ observations of the physical properties of the Martian surface, *The Martian Surface: Composition, Mineralogy, and Physical Properties*, ed. J.F. Bell III. Cambridge University Press, 2008, pp. 451-467.
18. Arvidson R.E. et al. (28 co-authors). Localization and Physical Properties Experiments Conducted by Spirit at Gusev Crater, *Science*, 2004, Vol. 305, pp. 821-824.
19. Lisov I. Posledniy parad nastupaet [Last parade begins], *Novosti kosmonavtiki* [The news of cosmonautics], 2010, No. 03, pp. 24-27.
20. Lisov I. Posledniy parad nastupaet [Last parade begins], *Novosti kosmonavtiki* [The news of cosmonautics], 2010, No. 05, pp. 28-33.
21. Malenkov M.I. et al. Key technologies of the Moon exploration: realization and perspectives of highly effective locomotion systems for the Moon rovers, *Proc. of the 8th ILEWG Conference on Exploration and Utilization of the Moon. Journal of Astronautics*. China. – Beijing: 2007, Vol. 28, No. 4, pp. 105-114.
22. Malenkov M.I., Stepanov V.V. Russian Greating Technologies of Planetary Rover Locomotion Systems, *Fifty Years of Space Research. Science*. Editor A. Zakharov. Moscow: Space Research Institute, 2009, pp. 257-272.
23. Malenkov M.I. «Sozdanie «Lunokhoda-1» – vydayushcheesya nauchno-tekhnicheskoe dostizhenie XX veka» [“Creation “Lunokhod-1” – outstanding scientific and technical achievement of the twentieth century”], *Vestnik FGUP «NPO im. S.A. Lavochkina»* [Bulletin of the FSUE “NPO im. S. A. Lavochkin”, 2011, No. 01, pp. 13-21.
24. Malenkov M.I. Creation of Lunokhod-1 as an Outstanding Scientific and Technological Achievement of the XX Century, *Solar System Research*, 2013, Vol. 47, No. 7, pp. 610-617
25. Kraynov A.M., Vorontsov V.A., Malenkov M.I. Prognozirovanie proektnogo oblika lunokhoda kak elementa kosmicheskogo kompleksa otechestvennoy programmy issledovaniya Luny [Forecasting project the image of the Rover as an element of the space of complex domestic program of the moon exploration], *Materialy XLIX chteniy «K.E. Tsiolkovskiy i strategiya kosmonavtiki»*. RAN [Materials XLIX readings “Tsiolkovsky and strategy of space”. Russian Academy of Sciences]. Kaluga, 2014, pp. 173-174.
26. Abdulkhalikov R.M. et al. (97 co-authors). Manned Mission to Mars. Editor-in-Chief A.S. Koroteyev. Russian Academy of Cosmonautics named K.E. Tsiolkovsky. Moscow, 2006, 313 p.
27. Iagnemma et al. Control of robotic vehicles with actively articulated suspensions in rough terrain, *Autonomous Robots. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands*, 2003, No. 14, pp. 5-16.
28. Bartlett P., Wettergreen D., Whittaker W.L. Design of the Scarab Rover for Mobility and Drilling in the Lunar Cold Traps, *Proc. International Symposium on Artificial Intelligence «Robotics and Automation in Space»*. Los Angeles, USA. February, 2008.
29. Ben Amar F. et al. Performance evaluation of locomotion modes of an hybrid wheel-legged robot for self-adaptation to ground conditions, *Proc. of the 8th ESA Workshop «ASTRA 2004»*. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, November 2-4, 2004.
30. Leppänen I. Automatic locomotion mode control of wheel-legged robots // Series A: Research Reports №30, Automation Technology Laboratory, Helsinki University of Technology, Espoo, Helsinki, 2007, 107 p.

31. Reid W. Goktogan A.H., Sukkarieh S.A. Highly Mobile Wheel-on-Leg Planetary Rover for use in a Martian Analogue Environment, *Proc. of 13th Australian Space Science Conference*, 2013, pp. 273-282.
32. ATHLETE. Available at: <https://www-robotics.jpl.nasa.gov/systems/system.cfm?System=11>. (Accessed 27 February 2015).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.П. Поршневу.

Гусева Наталья Константиновна – ЗАО «Научно-технический центр «РОКАД»; e-mail: natalia.guseva@rocad.ru; 196084, Санкт-Петербург, ул. Коли Томчака, 9Е; тел./факс: +88123656044, тел.: 89217430949; генеральный директор.

Лазарев Евгений Алексеевич – e-mail: eugeny.lazarev@rocad.ru; тел.: 89219548407; технический директор.

Маленков Михаил Иванович – e-mail: m.i.malenkov@gmail.com; тел.: 89219222977; д.т.н.; профессор; научный руководитель проекта.

Волов Валерий Анатольевич – ООО «АКТРОН»; e-mail: v_volov@online.de; 198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная, 2; к.т.н.; ведущий научный сотрудник.

Guseva Natalia Konstantinovna – STC «ROCAD» Co.Ltd; e-mail: natalia.guseva@rocad.ru; 9E, Koli Tomchaka street, St. Petersburg, 196084, Russia; phone/fax.: +78123656044, phone: +79217430949; the general director.

Lazarev Evgenii Alexeevich – e-mail: eugeny.lazarev@rocad.ru; phone: +79219548407; the technical director.

Malenkov Mikhail Ivanovich – e-mail: m.i.malenkov@gmail.com; phone: 89219222977; dr. of eng. sc.; professor; the supervisor of studies of the project.

Volov Valery Anatol'evich – ACTRON Co. Ltd; e-mail: v_volov@online.de; 2, Zarechnaya street, St. Petersburg, 198323, Russia; cand. of eng. sc.; the senior research assistant.