

УДК 520.6

НАЗЕМНЫЕ ОТРАБОТКИ ЛУННОГО МАНИПУЛЯТОРНОГО КОМПЛЕКСА ПРОЕКТА ЛУНА-25

© 2021 г. М. Л. Литвак^{а, *}, Т. О. Козлова^а, А. Г. Ильин^а, А. Б. Киселев^а, А. С. Козырев^а, И. Г. Митрофанов^а, А. В. Носов^а, В. Ф. Папко^а, В. И. Третьяков^а, В. А. Яковлев^а, Е. Н. Слюта^б, Е. А. Гришакина^б, В. Ю. Маковчук^б

^аИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^бИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, Москва, Россия

*e-mail: litvak@mx.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 10.05.2021 г.

После доработки 10.06.2021 г.

Принята к публикации 21.06.2021 г.

В статье представлено описание наземных испытаний, которые были проведены с лунным манипуляторным комплексом (ЛМК), специально разработанным для российской лунной посадочной миссии, Луна-25. ЛМК предназначен для изучения механических свойств и структуры лунного реголита, забора проб лунного вещества с разной глубины и их последующей доставки для анализа элементного и изотопного состава в лазерный ионизационный масс-спектрометр ЛАЗМА-ЛР. Кроме этого, на ЛМК установлен инфракрасный спектрометр и стереокамеры рабочего поля ЛМК (оптическая часть прибора ЛИС-ТВ-РПМ), которые ЛМК должен наводить на различные участки лунной поверхности. В статье представлены результаты различных функциональных тестов, подтверждающих успешную реализацию требований, предъявляемых к ЛМК, включая работу с лунным грунтом в условиях космического вакуума и криогенных температур.

Ключевые слова: Луна, приполярные области, лунный манипулятор, лунный грунт, забор лунного грунта

DOI: 10.31857/S0320930X21060062

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время космические агентства различных стран (США, Китая, России и других) разрабатывают комплексные программы освоения Луны. На начальном этапе, с помощью автоматических станций, они включают поиск наиболее благоприятных мест посадки, в том числе и с точки зрения природных ресурсов, для будущей высадки космонавтов. В последнее время значительных успехов добилось Китайское национальное космическое управление, которое в конце 2020 г. успешно осуществило (миссия **Chang'e-5**) возврат лунного грунта из молодых лавовых областей в Океане Бурь. Всего на Землю было доставлено около 1.7 кг лунного грунта (см. Lin и др., 2021). Для этого использовалось буровое устройство (глубина бурения до 2 м) и манипулятор, обеспечивший поверхностный сбор грунта и обломков лунной породы. Это первое использование манипулятора на Луне для активного взаимодействия и работы с лунным реголитом в ходе операций на поверхности. Хотя манипулятор на посадочном аппарате **Chang'e-5** проработал лишь в течение небольшого времени (в течение не-

скольких дней до старта возвратного модуля), использование подобных устройств на будущих лунных миссиях может существенно расширить список научных и практических задач, независимо от того, будут манипуляторы использоваться на стационарных платформах или на луноходах. Многолетний опыт, полученный в марсианских исследованиях, только подтверждает это. Два тяжелых марсохода NASA Curiosity и Perseverance оборудованы руками-манипуляторами, позволяющими бурить, шлифовать марсианский грунт, брать его образцы, проводить его предобработку и доставлять в аналитические приборы для анализа, направлять другие приборы для детального изучения различных объектов на поверхности и даже проводить диагностику марсохода (см., например, Grotzinger и др., 2012; Farley и др., 2020; Moeller и др., 2021). Марсианская посадочная платформа NASA Insight также оборудована рукой-манипулятором, которая позволила расставить научные приборы на поверхности Марса, проводить простые монтажные работы, копать грунт (оборудована ковшом) и проводить видеосъемку (см. Trebi-Ollennu и др., 2018). С учетом задач геологоразведки, которые сейчас ставятся пе-

ред будущими лунными миссиями и требуют комплексного исследования различных свойств лунного грунта, использование различных типов манипуляторных устройств будет только расширяться.

Наибольшее внимание сейчас обращено на высокоширотные, и прежде всего полярные, районы Луны, где могли сохраниться различные летучие вещества, включая водяной лед (см., например, Pieters и др., 2009; Colaprete и др., 2010; Mitrofanov и др., 2010; Sanin и др., 2017). В эти области на поверхности Луны ни автоматические аппараты, ни пилотируемые миссии по программе Apollo еще не селились. Обнаружение же локальных районов, обогащенных водяным льдом, представляет как научный, так и практический интерес. С научной точки зрения изотопный состав водяного льда может помочь ответить на вопрос о его происхождении (эндогенная или экзогенная вода), и соответственно предоставить новую информацию об эволюции Солнечной системы и образовании системы Земля–Луна. С другой стороны, обнаружение большого количества водяного льда представляет и сугубо практический интерес, так как вода необходима для различных нужд космонавтов, производства кислорода для дыхания, водорода для ракетного топлива и пр. Таким образом, может быть выбран потенциальный район, где будет развернута лунная база.

Водяной лед может находиться прямо на поверхности, на дне вечнотененных полярных кратеров. Сюда не попадает прямой солнечный свет, а температура может опускаться до нескольких десятков кельвинов (см., например, Watson и др., 1961; Vasavada и др., 1999) и поэтому эти области малопривлекательны для посадок космических аппаратов. К счастью, в ряде случаев водородный сигнал обнаруживается и в освещенных районах (Mitrofanov и др., 2012; Sanin и др., 2017). Здесь водяной лед мог сохраниться на некоторой глубине благодаря изолирующему верхнему сухому слою лунного реголита. Это означает, что для исследований необходимо использовать аппаратуру, позволяющую извлечь образцы лунного грунта с определенной глубины и доставить их для анализа в аналитические приборы, что только подтверждает необходимость использования на борту посадочных миссий буровых устройств и манипуляторов.

Российская лунная программа на первом этапе предусматривает исследование Луны с помощью автоматических станций.

В октябре 2021 г. спустя 45 лет после завершения последней советской посадочной миссии Луна-24 (Барсуков, 1980), планируется запуск первой российской лунной посадочной миссии Луна-25. В ее научные задачи входит изучение минералогического, химического, изотопного состава лун-

ного реголита, а также поиск летучих соединений (в том числе водяного льда и органических соединений) в приповерхностном слое реголита высокоширотных областей Луны (Казмерчук и др., 2016; Митрофанов и др., 2021). В качестве места посадки космического аппарата Луна-25, впервые в истории исследования Луны был выбран высокоширотный район с координатами 43.544° восточной долготы и 69.545° южной широты, расположенный к северу от кратера Богуславский (Дьячкова и др., 2017).

Для непосредственного исследования свойств лунного реголита в миссии Луна-25 было предложено использовать легкий и компактный, но при этом многофункциональный, лунный манипуляторный комплекс (ЛМК).

В этой статье мы представили краткий обзор наземных функциональных испытаний, которые были проведены с ЛМК, чтобы проверить выполнение всех необходимых требований, включая наведение на заданный участок лунной поверхности, взятие проб лунного грунта с разной глубины, доставку собранных образцов для элементного и изотопного анализа в лазерный ионизационный масс-спектрометр ЛАЗМА-ЛР, проверку взаимодействия ЛМК с аналогом лунного грунта, обогащенного водяным льдом, в условиях низкого давления и криогенных температур.

ОПИСАНИЕ ЛМК

Из-за существенных ограничений по массе научной аппаратуры КА Луна-25 ЛМК был разработан как легкий и компактный манипулятор, в то же время способный обеспечить копание лунного реголита, забор, доставку и выгрузку собранных образцов в лазерный ионизационный масс-спектрометр ЛАЗМА-ЛР, установленный в верхней части космического аппарата (Козлова и др., 2021). В указанном приборе образец лунного реголита помещается на приемный вращающийся диск на расстоянии, соответствующем фокусному расстоянию лазера, излучение которого испаряет и ионизирует образец грунта, а образовавшиеся ионы попадают во времяпролетный масс-спектрометр. По времени пролета ионов и интенсивности сигнала можно определить массу ионов и их концентрацию (Чумиков и др., 2020).

Полная масса ЛМК не превышает 5.5 кг, а его максимальная длина в разложенном состоянии составляет около 1.6 м, что в текущей конфигурации размещения на борту КА Луна-25 позволяет осуществлять копание лунного грунта на глубину до 25 см.

На ЛМК установлен прибор ЛИС-ТВ-РПМ, объединяющий в себе инфракрасный спектрометр и стереокамеру. Стереокамеру планируется использовать для детальной съемки рабочей зоны ЛМК и более точного наведения инфракрасного

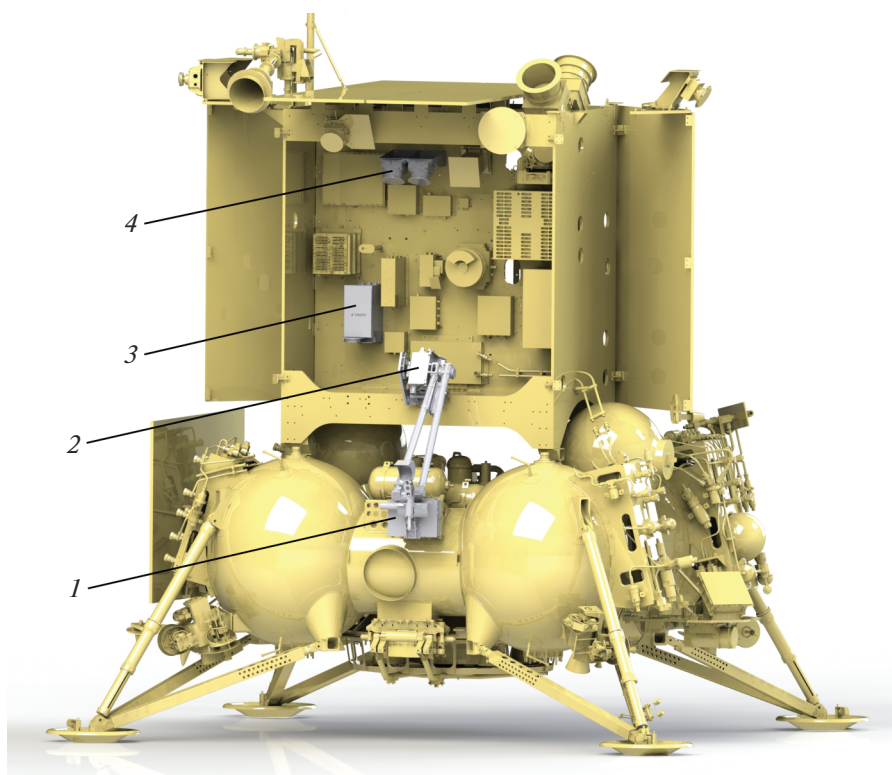


Рис. 1. Визуализация космического аппарата Луна-25 с установленными приборами. 1 – ЛМК, 2 – ЛИС-ТВ-РПМ, 3 – ЛАЗМА-ЛР, 4 – стереокамеры СТС-Л.

спектрометра на различные участки лунной поверхности (вблизи и вдали от КА), чтобы изучить ее минеральный состав и исследовать грунт, выкопанный ЛМК (Манцевич и др., 2021). Излучение в ИК-диапазоне имеет несколько спектральных особенностей, обусловленных наличием водяного льда, поэтому их детектирование также предоставит дополнительную информацию о нахождении водяного льда в районе посадки Луна-25 (Манцевич и др., 2021).

Кроме того, для независимого определения координатной сетки рабочего поля ЛМК и коррекции траекторий его движения используется блок стереокамер служебной телевизионной системы СТС-Л, установленный на термостабилизированной плите в верхней части КА Луна-25 (там же расположен прибор ЛАЗМА-ЛР). Расположение приборов на КА Луна-25 представлено на рис. 1.

ЛМК состоит из четырех приводов (азимутального, плеча, локтя и запястья), двух штанг, кронштейна для установки ЛИС-ТВ-РПМ, и блока электроники (см. рис. 1). Блок электроники находится в основании ЛМК и крепится на блок топливных баков двигательной установки в нижней части посадочного аппарата. На конце первой штанги закреплен прибор ЛИС-ТВ-РПМ,

на конце второй штанги установлен ковш и грунтозаборник (см. рис. 2 и рис. 3).

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И КАЛИБРОВКИ ЛМК В НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Наземные функциональные испытания и калибровки ЛМК были разделены на две категории. Первая часть работ была проведена в нормальных (комнатных) условиях и в основном касалась отработки кинематической схемы ЛМК. Вторая часть функциональных испытаний была посвящена изучению взаимодействия ЛМК и аналога мерзлого лунного реголита и соответственно проводилась в специальной термовакуумной камере в условиях, приближенных по давлению и температуре к тем, что ожидаются на лунной поверхности.

В этом разделе мы кратко суммировали результаты, полученные в ходе функциональных испытаний и калибровок в нормальных (комнатных) условиях.

Основные цели этих испытаний и калибровок можно сформулировать следующим образом:

- 1) создание методики копания и забора грунта;
- 2) совместные калибровки ЛМК и стереокамеры СТС-Л для выбора места забора грунта по данным фотосъемки лунной поверхности;



Рис. 2. Трехмерная модель прибора ЛМК. 1 – азимутальный привод; 2 – привод плеча; 3 – привод локтя; 4 – привод запястья.

3) совместные калибровки ЛМК и стереокамеры СТС-Л для коррекции траектории движения ЛМК при доставке образцов грунта в прибор ЛАЗМА-ЛР;

4) отработка возможных нештатных ситуаций при копании и доставке грунта.

Все функциональные испытания ЛМК были проведены в ИКИ РАН. Для этого использовался имитатор КА Луна-25 с установленными на нем технологическим (ТО-1) или конструкторско-доводочным (КДО) образцами ЛМК, а также лабораторным образцом стереокамер СТС-Л и габаритными макетами остальных научных приборов.

Выбор места копания

Рабочая зона копания ограничена из-за того, что на посадочном аппарате Луна-25 ЛМК установлен на проставке между блоками баков на достаточно большой высоте, а также из-за наличия дополнительного шар-баллона, находящегося непосредственно в зоне работы ЛМК под его установочной плоскостью.

Границы рабочей зоны ЛМК на поверхности Луны задаются в полярной системе координат и представляют собой пересечение двух окружностей с радиусами 383 и 835 мм по горизонтали от привода поворота, с ограничением от минус 65° до плюс 65° по азимуту от исходного положения

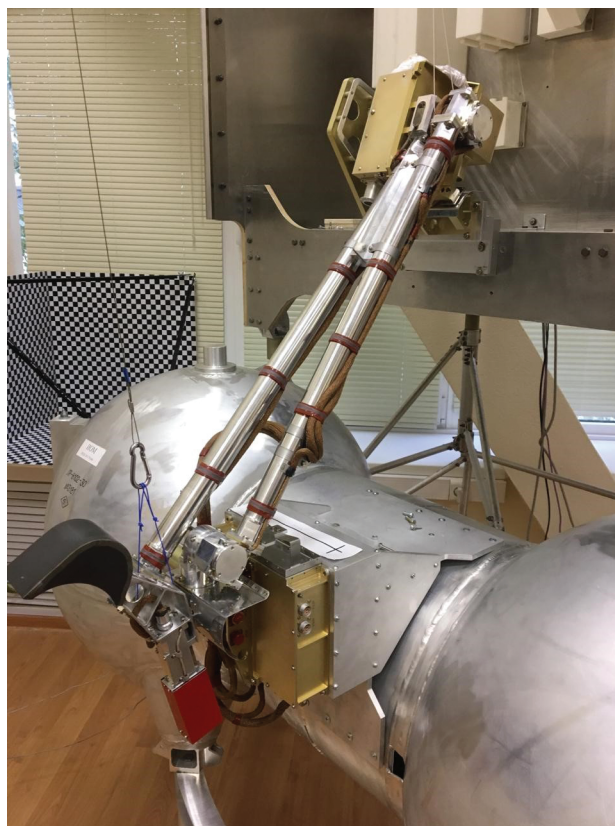


Рис. 3. Конструкторско-доводочный образец ЛМК, установленный на имитаторе КА в ИКИ РАН для проведения функциональных испытаний. Вверху виден прибор ЛИС-ТВ-РПМ, внизу – ковш, грунтозаборник, закрытый защитным кожухом, и блок управления (слева направо).

(см. рис. 4). По высоте допустимая рабочая зона ЛМК простирается от 0 до 780 мм, отсчитываемых от его исходного положения.

В ходе работы на лунной поверхности ЛМК должен доставить из разных мест своей рабочей зоны 11 проб лунного реголита в аналитический прибор ЛАЗМА-ЛР. Выбор каждого места копания должен определяться по совокупности научных и инженерных требований. В том числе они включают выбор наиболее интересного участка поверхности, обеспечение движения ЛМК по безопасной траектории, избегая столкновений с элементами конструкции посадочного аппарата, необходимость доставки сыпучего грунта, по возможности без мелких камней, обработка которых прибором ЛАЗМА-ЛР не предусмотрена. Кроме этого, необходимо исключить участки, где могут находиться крупные камни или обломки породы, мешающие штатной работе ЛМК. Для этого после посадки на поверхность Луны предусмотрена фотосъемка рабочей зоны копания ЛМК и самого ЛМК с помощью стереокамеры СТС-Л.

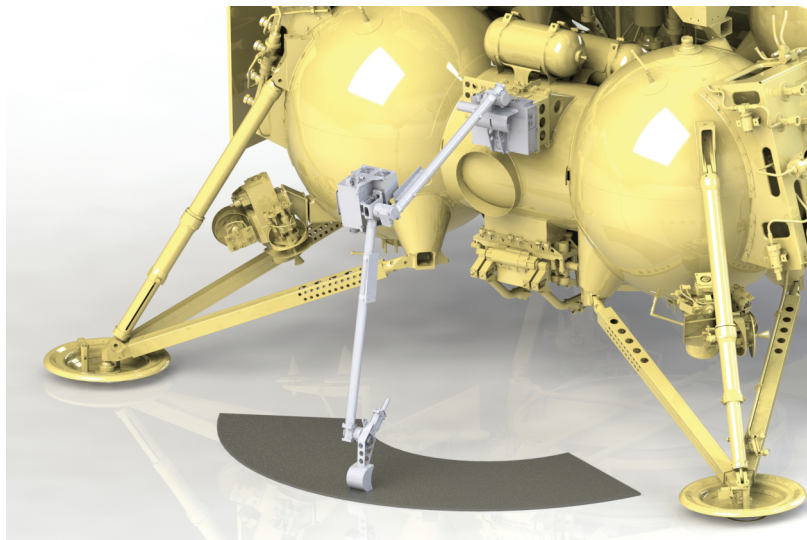


Рис. 4. Рабочая зона ЛМК при копании лунного грунта.

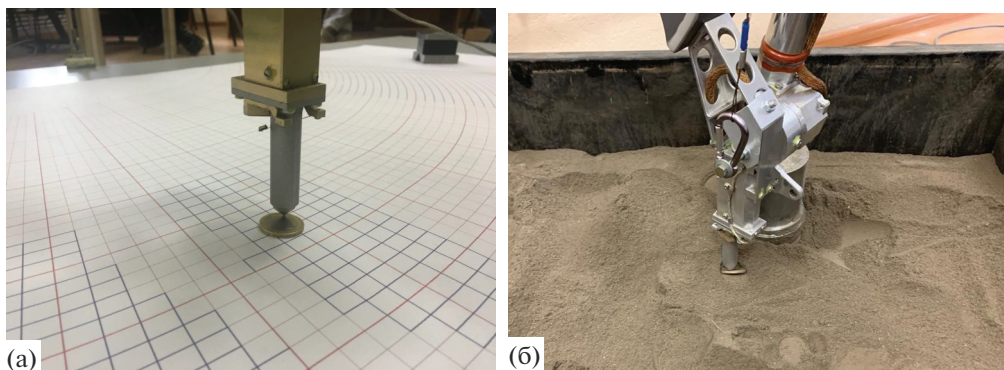


Рис. 5. а. Калибровка ТО ЛМК по данным стереокамер СТС-Л для выхода в произвольно заданную точку внутри рабочей зоны копания ЛМК (в качестве объекта использовалась монета). На фото показано, как ЛМК попадает в область с характерными размерами ~15 мм. б. Проверка алгоритма выхода КДО ЛМК в заданную точку копания на аналоге лунного грунта. В качестве объекта наведения снова использовалась монета с линейным размером ~15 мм.

Стереокамеры СТС-Л позволяют построить цифровую модель рельефа подстилающей рабочей зоны копания ЛМК. В системе координат ЛМК указанная зона была разбита на трехмерную сетку с размером ячеек от $6 \times 10 \times 60$ до $13 \times 10 \times 60$ мм (130 сегментов по азимуту, 44 сегмента по горизонтали и 13 сегментов по высоте, см. рис. 5а). Для каждого узла сетки была построена, протестирована и сохранена в памяти блока управления ЛМК траектория движения ЛМК из его исходного положения. В ходе взаимных калибровок ЛМК и СТС-Л была создана математическая модель, позволяющая перейти от прямоугольной системы координат СТС-Л к полярной системе координат ЛМК. Таким образом, выбор точки копания с помощью цифровой модели рельефа ЛМК трансформируется в выбор конкретного узла сетки рабочего поля ЛМК и использование тра-

ектории ЛМК, сохраненной в памяти БУ ЛМК для этого узла сетки.

В ходе наземных калибровок было показано, что ЛМК попадает в объект с линейным размером 15 мм (монета), произвольно установленном в любом месте рабочей зоны копания ЛМК, см. рис. 5.

Необходимо учитывать, что СТС-Л и ЛМК закреплены на разных силовых элементах посадочного аппарата, поэтому их взаимное положение после посадки может измениться за счет небольших механических деформаций и тепловых расширений. После посадки с помощью СТС-Л будут сделаны снимки ЛМК в различных положениях с целью проверки, и, при необходимости, корректировки перехода от системы координат СТС-Л к системе координат ЛМК.

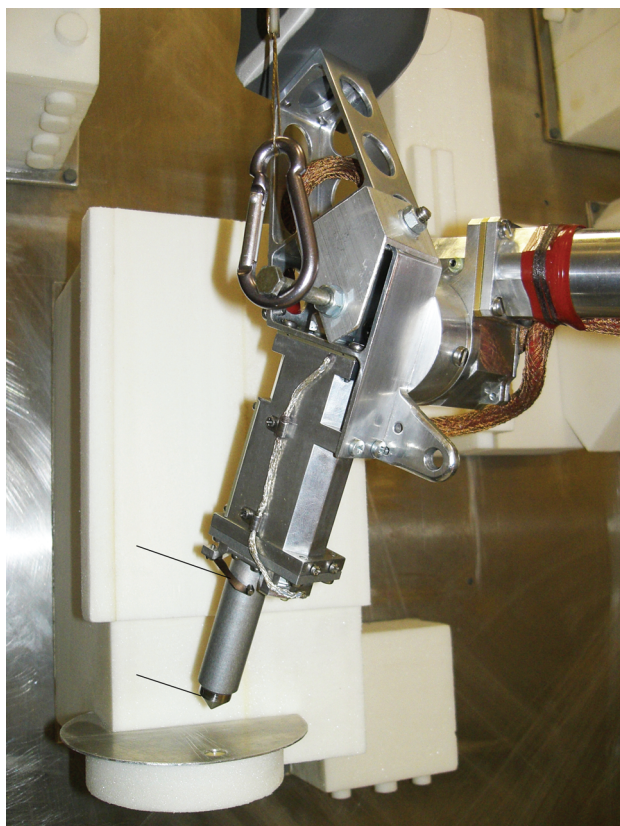


Рис. 6. Грунтозаборник с выдвинутым конусом в нижней части приемной трубки над макетом приемного окна ЛАЗМА-ЛР. 1 – поршень/конус для измерения плотности грунта, 2 – датчик контакта с грунтом.

Создание методики копания и забора грунта

Так как в основные задачи ЛМК входит забор образцов лунного грунта, то одной из первых функциональных наземных калибровок было создание методики копания. Операционно процесс копания и взятия образца реголита можно разделить на четыре составляющие: выбор точки копания, оценка расстояния до поверхности грунта, проверка жесткости грунта, снятие верхнего слоя грунта до нужной глубины и собственно забор грунта.

Уровень грунта не является детерминированным и его нельзя точно зафиксировать во время наземных калибровок. После посадки высота от уровня поверхности Луны в точке копания до места закрепления ЛМК будет зависеть от локального рельефа подстилающей поверхности, наклона посадочного аппарата, небольшого обжатия посадочных опор КА. Предварительно расстояние до поверхности может оцениваться с помощью стереокамер СТС-Л. Более точную оценку сделает сам ЛМК с помощью системы своих датчиков.

При работе с грунтом используются опрос следующих датчиков:

- два дублированных датчика касания с грунтом;
- датчик для измерения плотности грунта (поршень-конус);
- датчики защиты по скорости;
- датчики перегрузки по току.

Для определения уровня грунта используются датчики касания с грунтом (рис. 6). Порядок определения уровня грунта следующий: ЛМК выводится к точке начала траншеи, грунтозаборник разворачивается перпендикулярно поверхности грунта и опускается в грунт вертикально вниз до срабатывания датчика контакта с грунтом. Точность вертикального перемещения составляет 3.75 мм. Датчик контакта с грунтом срабатывает в том случае, если трубка грунтозаборника на всю длину погрузится в грунт до момента поджатия пружины датчика. Срабатывание датчика контакта с грунтом свидетельствует о том, что грунт рыхлый и пригоден для использования стандартных циклограмм копания.

Важную роль при копании играет плотность грунта. При измерении уровня грунта из трубки грунтозаборника выдвигается внутренний подпружиненный поршень-конус. В случае, если грунт плотный, при погружении трубки грунтозаборника в грунт давление на конус сжимает пружину, степень сжатия которой контролируется с помощью трех электромеханических датчиков (герконов), откалиброванных на различные усилия (см. рис. 7). При срабатывании всех трех датчиков до момента срабатывания датчиков контакта с грунтом, грунт классифицируется как твердый. Фактически срабатывание датчиков плотности грунта и не срабатывание датчика контакта с грунтом означает, что усилие на внедрение трубки в грунт превысило 17 Н.

При копании используются привод запястья, в конце выкапывания траншеи используется привод локтя. Для отдельного цикла копания задаются следующие параметры:

- профиль копания (в зависимости от данных датчиков контакта с грунтом и датчиков плотности грунта);
- глубина копания (определяемая количеством копков и их глубиной в зависимости от профиля копания);
- точка начала траншеи;
- высота безопасного горизонтального движения (на эту высоту будет подниматься ковш с грунтом для дальнейшего выноса его за пределы рабочей зоны);
- параметры датчиков ограничения по скорости и току.

Кинематику одного цикла копания можно описать следующей последовательностью:

- 1) после определения уровня грунта грунтозаборник и ковш поднимаются к точке начала траншеи, ковш поворачивается на 69° относительно

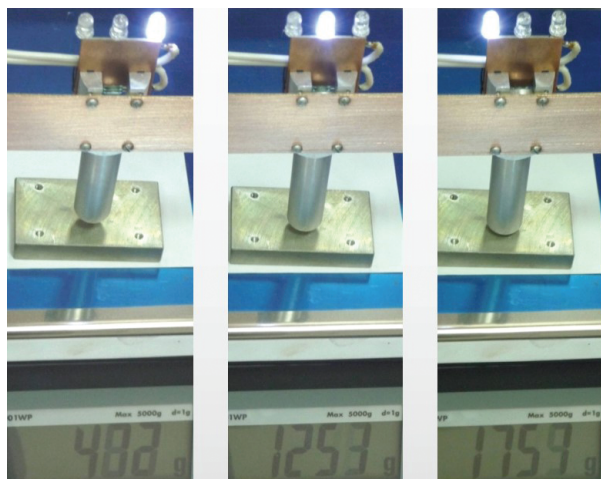


Рис. 7. Принцип действия датчика плотности грунта. Слева направо – срабатывание последовательно трех датчиков при увеличении усилия нажима на конус грунтозаборника ЛМК.



Рис. 8. Формирование двух траншей при заглаблении ЛМК в грунт.

вертикали таким образом, чтобы нож ковша был ортогонален к поверхности грунта и опускается до уровня грунта;

2) производится первое погружение в грунт: ковш поворачивается приводом запястья до угла 174° , при достижении им угла в 154° , дополнительно включается привод локтя (оба привода работают одновременно), который двигает ковш горизонтально, обеспечивая уплотнение грунта в траншее;

3) реверсное движение приводом локтя обеспечивает перенос ковша с грунтом от отвала грунта в конце траншеи для облегчения вертикального подъема вверх до безопасной высоты, ковш по горизонтальной траектории переносит грунт и высыпает его за пределами рабочей зоны и возвращается к началу траншеи;

4) процедура повторяется итерационно до тех пор, пока не будет достигнута нужная глубина траншеи, либо пока не придет команда остановить копание.

Принятое размещение ЛМК на посадочном аппарате Луна-25 позволяет заглабляться в лунный грунт на глубину 200–250 мм. В связи с тем, что ковш имеет размеры меньше, чем размеры привода запястья, с увеличением глубины траншеи привод может начать задевать поверхность грунта. Для этого случая предусмотрено формирование дополнительных траншей, смежных с основной (см. рис. 8). Так, при заглаблении до 90 мм формируется только одна основная траншея, при заглаблении до 180 мм последовательно формируются две траншеи, и наконец, при копании на максимальную глубину область копания расширяется за счет формирования трех траншей.

Твердость грунта влияет на выбор оптимального профиля копания с разным характерным шагом по глубине за одно погружение ковша. Для мягкого грунта предусмотрено, что глубина одного погружения ковша в грунт может составлять 20–30 мм. В случае твердого грунта, чтобы избежать больших нагрузок на приводы ЛМК, автоматически уменьшается скорость копания и соответственно увеличивается время, затраченное на весь цикл копания. Глубина одного погружения ковша при этом может составлять 10–20 мм. Во время функциональных испытаний было показано, что характерное время копания одной траншеи глубиной до 90 мм составляет до 15 мин. Копание на полную глубину (250 мм) может занять около часа.

После завершения копания подается команда на забор грунта с помощью грунтозаборника и перенос забранного грунта в ЛАЗМА-ЛР. Поршень-конус втягивается внутрь, освобождая полость трубки грунтозаборника. Длина приемной трубки грунтозаборника позволяет взять непогруженный грунт на 50 мм ниже дна выкопанной траншеи. При полном погружении общий объем пробы достигает несколько кубических сантиметров, что с большим запасом (с учетом возможной частичной потери собранного грунта во время доставки) покрывает потребности прибора ЛАЗМА-ЛР, которые составляют доли кубического сантиметра.

Отработка этой методики копания происходила на имитаторе космического аппарата Луна-25, поэтому после установки штатного образца ЛМК на посадочный аппарат предусмотрены укороченные функциональные испытания для проверки привязки систем координат КА, СТС-Л и ЛМК и проверки траекторий движения ЛМК с

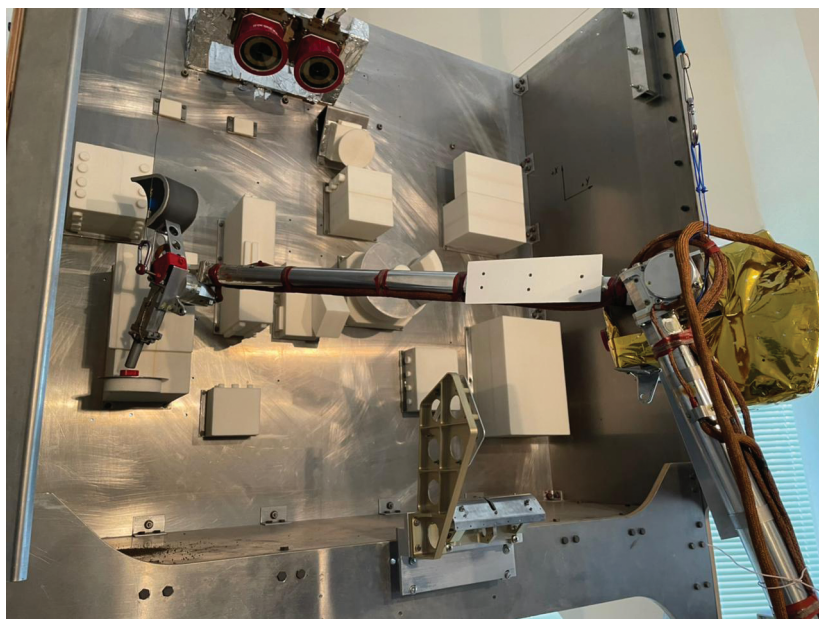


Рис. 9. Выход грунтозаборника КДО ЛМК в заданное положение для выгрузки собранного грунта в приемное окно макета прибора ЛАЗМА-ЛР.

учетом финальной компоновки летного КА и размещения ЛАЗМА-ЛР.

Также учитывается, что СТС-Л и ЛМК закреплены на разных силовых элементах посадочного аппарата, поэтому их взаимное положение после посадки может немного измениться за счет небольших механических деформаций и тепловых расширений. После посадки с помощью СТС-Л будут сделаны снимки ЛМК в различных положениях с целью проверки, и при необходимости, корректировки перехода от системы координат СТС-Л к системе координат ЛМК.

Доставка образцов грунта в ЛАЗМА-ЛР

ЛМК должен загрузить собранные образцы лунного реголита в приемное окно аналитического прибора ЛАЗМА-ЛР. Во время наземных калибровок была отработана наиболее оптимальная, исключающая столкновение с элементами конструкции КА и непосредственно с прибором ЛАЗМА-ЛР, траектория движения ЛМК, позволяющая реализовать эту функцию. Все траектории ЛМК, независимо от места копания и забора грунта, построены таким образом, что они проходят через исходное положение ЛМК, от которого движение в ЛАЗМА-ЛР является уже детерминированным. Функциональные испытания показали, что время, которое требуется, чтобы забрать грунт и доставить его в приемное окно ЛАЗМА-ЛР, составляет около 3 мин. Основные отработки были сделаны в ИКИ РАН на имитаторе КА (см. рис. 9), а дополнительные калибровки будут сделаны после установки штатного образца ЛМК на борт КА

Луна-25, чтобы скорректировать по месту (если потребуется) траекторию движения от исходного положения к приемному окну ЛАЗМА-ЛР.

ЛАЗМА-ЛР установлен на термостабилизированной плите в верхней части КА, а ЛМК – в нижней части КА на блоке баков. Поэтому после посадки взаимное расположение ЛМК и ЛАЗМА-ЛР может измениться за счет механических и тепловых деформаций и траектория выхода в ЛАЗМА-ЛР потребует корректировки. Этот эффект учитывался в ходе наземных функциональных испытаний. Для этого были использованы фотоснимки, полученные со стереокамер СТС-Л, показывающие взаимное расположение приемного окна ЛАЗМА-ЛР и грунтозаборника ЛМК при подходе к ЛАЗМА-ЛР (см. рис. 9). В случае отклонения от номинального положения должна вводиться необходимая коррекция в траекторию ЛМК. В наземных калибровках это имитировалось разными положениями приемного окна ЛАЗМА-ЛР. Было показано, что разрешения фотоснимков и точности привязки системы координат СТС-Л и ЛМК достаточно, чтобы учесть возможные изменения во взаимном расположении ЛМК и ЛАЗМА-ЛР (относительное смещение приемного окна >5 мм).

Имитация нештатных ситуаций

Вся научная аппаратура (кроме системы технического зрения СТС-Л) на борту КА Луна-25 управляется с помощью прибора БУНИ (блок управления научной аппаратурой и сбора научной информации), разработанным в ИКИ РАН

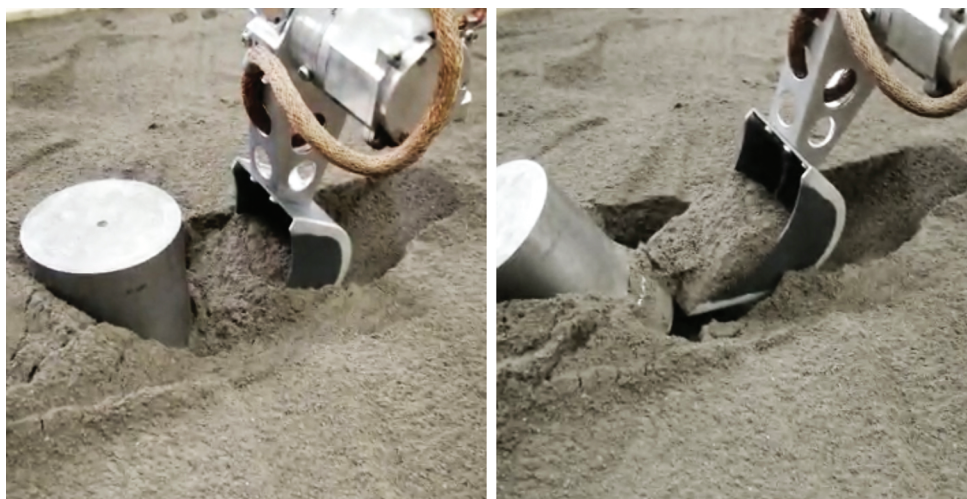


Рис. 10. Имитация столкновения ковша ЛМК с тяжелым камнем при копании.

(Ануфрейчик и др., 2021). ЛМК и БУНИ создавались для КА Луна-25 с учетом серьезных ограничений по массе, поэтому функционал обоих приборов для самодиагностики и анализа нештатных ситуаций ограничен. БУНИ не анализирует никаких специальных “флагов”/сообщений от ЛМК, и остановка выполнения циклограммы происходит только по истечении заданного времени. Для реакции на нештатные ситуации в ЛМК на каждый привод установлены датчики защиты по скорости и датчики перегрузки по току. Их срабатывания могут прервать движения ЛМК до поступления следующей команды или запустить определенную последовательность действий. Например, при копании может произойти осыпание траншеи, что может привести к застреванию ковша в грунте и к срабатыванию датчика скорости (зафиксировавшего ее нештатное падение) на одном или нескольких приводах, задействованных при копании. В этом случае автоматически запустится алгоритм выхода ковша ЛМК из траншеи в исходную точку копания и дальнейшего продолжения копания для расчистки образовавшегося завала. Этот процесс будет итерационно продолжаться до тех пор, пока либо завал не будет расчищен, либо выйдет время, отведенное на копание.

Срабатывание датчика скорости при заборе грунта может произойти, если грунт очень твердый или грунтозаборник натолкнулся на камень. В этом случае процесс заглубления грунтозаборника автоматически прекращается и запускается алгоритм доставки образца грунта в прибор ЛАЗМА-ЛР.

Срабатывание датчиков перегрузки по току также прекращает движение ЛМК и переводит его в ждущий режим. Уровни срабатывания датчиков скорости и тока могут быть изменены командным образом, если, например, потребуется

копать более твердый, чем ранее ожидалось, грунт.

Во время функциональных испытаний отрабатывались некоторые нештатные ситуации, включая сбой движения ЛМК и его столкновение с элементами конструкции КА, застревание ковша при копании траншеи (попадание на большой камень), остановка ГЗУ при погружении в твердый грунт и т.п. На рис. 10 продемонстрировано, как при копании ЛМК может натолкнуться на большой и тяжелый камень. Здесь в качестве препятствия использовался стальной цилиндр весом 5 кг. В процессе выкапывания камня сработали датчики скорости и запустился итерационный процесс выхода в исходную точку и повторения копания, в ходе которого ЛМК за отведенное время (заложенное на выполнение циклограммы) смог сдвинуть “камень” и произвести забор грунта.

НАЗЕМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛМК С АНАЛОГОМ МЕРЗЛОГО ЛУННОГО ГРУНТА

В ходе наземных испытаний вся научная аппаратура, предназначенная для проведения космического эксперимента, проходит обязательные испытания в термовакуумной камере для проверки работоспособности в широком диапазоне температур в условиях глубокого вакуума. Для ЛМК этих испытаний оказалось недостаточно, так как кроме работы в космических условиях он должен взаимодействовать с лунным реголитом, замороженным до криогенных температур. Поэтому дополнительно к функциональным калибровкам ЛМК, рассмотренным в предыдущем разделе, была выполнена программа испытаний для проверки возможностей ЛМК в части копания и забора проб мерзлого лунного реголита.

Криовакуумный стенд

Для решения этой задачи был разработан и создан специальный криовакуумный стенд (КВС), позволяющий размещать внутри себя ТО-1 ЛМК, а также охлаждаемый контейнер с аналогом лунного грунта.

В состав КВС входит криовакуумная камера с герметично подсоединенным к ней криоконтейнером, вакуумная откачная система и криогенная система (рис. 11). Внутренний объем камеры и криоконтейнера образуют единое пространство с объемом около 1 м³, в котором осуществляется испытание ТО-1 ЛМК.

Внутри криоконтейнера расположен криососуд с внутренним диаметром 500 мм и высотой 520 мм, образованный двумя коаксиально расположенными цилиндрами, в который помещается исследуемый образец грунта (см. рис. 12). В процессе испытаний было использовано около 80 кг аналога лунного грунта. В пространство, образованное коаксиальными цилиндрами криососуда подается хладагент (жидкий азот или его подогретые пары), что обеспечивает захлаживание образца грунта до температуры ниже минус 100°С, поддержание в процессе испытаний температуры на заданном уровне, а также последующий отогрев образца перед вскрытием камеры. На корпусе криоконтейнера располагается герметичный токоввод, обеспечивающий связь термодатчиков, установленных в различных зонах образца грунта с измерительной аппаратурой.

Вакуумная камера и криоконтейнер имеют двустенную вакууммируемую оболочку, защищающую внутреннее пространство от теплопритоков со стороны атмосферы во время захлаживания образца грунта при атмосферном давлении в среде “сухого” газа (сухая азотная атмосфера).

В камере расположен экран, образованный двумя аксиально расположенными цилиндрами, пространство между которыми заполняется жидким азотом (см. рис. 11). Рабочее пространство внутри экрана имеет диаметр 715 мм и высоту 1080 мм. Экраны выполняют двойную роль, осуществляя криоконденсационную откачку паров воды и конденсируемых при температуре жидкого азота газов органического происхождения, а также обеспечивая радиационный отвод тепла с исследуемого ЛМК и поверхности образца грунта, имитируя теплоотвод в космическое пространство.

В верхней части камеры, на торцевом фланце, установлен кронштейн, на конце которого крепится ТО-1 ЛМК. Связь ЛМК с приборами питания, контроля и управления осуществляется через герметичные токовводы, размещенные на фланце камеры.

Вакуумная откачная система стенда состоит из форвакуумного насоса, высоковакуумного турбо-

молекулярного насоса и вспомогательного криосорбционного насоса, а также вакуумметров, что обеспечивает форвакуумную и высоковакуумную откачку внутреннего объема и теплозащитных полостей криовакуумной камеры, поддержание и контроль заданного давления внутри КВС.

Криогенная система КВС предназначена для подачи в элементы криовакуумной системы жидкого и газообразного азота. Жидкий или парообразный азот подается в необходимом количестве в криососуд криоконтейнера для охлаждения образца реголита и поддержания его температуры.

Для непосредственного наблюдения за ходом испытаний внутри вакуумной камеры размещается система светодиодной подсветки и две видеокамеры, снимающие перемещение ЛМК с разных ракурсов. Также использовалась сеть термодатчиков, чтобы контролировать температуру различных узлов ЛМК, азотных экранов и грунта.

КВС способен поддерживать минимальное давление на уровне 10⁻⁵ Па, обеспечить температуру окружающего пространства (азотные экраны) около -190°С и заохладить весь объем аналога лунного реголита до криогенных температур ниже -100°С. Испытания с ЛМК проводились, когда температура грунта в области копания находилась в диапазоне от -140° до -100°.

Аналог лунного грунта

Использованный аналог лунного грунта (ЛГА-1) был специально разработан в ГЕОХИ РАН для испытаний ЛМК. Создать полный аналог лунного грунта невозможно, тем более создать аналог грунта из высокоширотных областей Луны, откуда еще никто не доставлял образцов грунта на Землю (см., например, Слюта и др., 2014). Поэтому при создании аналогов лунных грунтов обычно стараются смоделировать те свойства, которые наиболее важны для планируемого космического эксперимента (например, физико-механические, оптико-физические, тепловые и др.). В случае с испытаниями ЛМК основные требования предъявлялись к имитации основных физико-механических свойств оригинального лунного грунта (Slyuta и др., 2021), которые существенно влияют на процесс копания и забора образцов.

К физико-механическим свойствам лунного грунта относятся гранулометрический состав, плотность и пористость, удельное сцепление грунта (когезия), адгезия (сцепление разнородных фракций грунта), угол внутреннего трения (линейную зависимость сопротивляемости грунта от нагрузки, приходящейся вертикально, прочность грунта на сдвиг, деформационные характеристики, сжимаемость и др.).

Одной из определяющих характеристик является плотность реголита и ее изменение с глубиной. Лунный грунт в предельно рыхлом состоянии

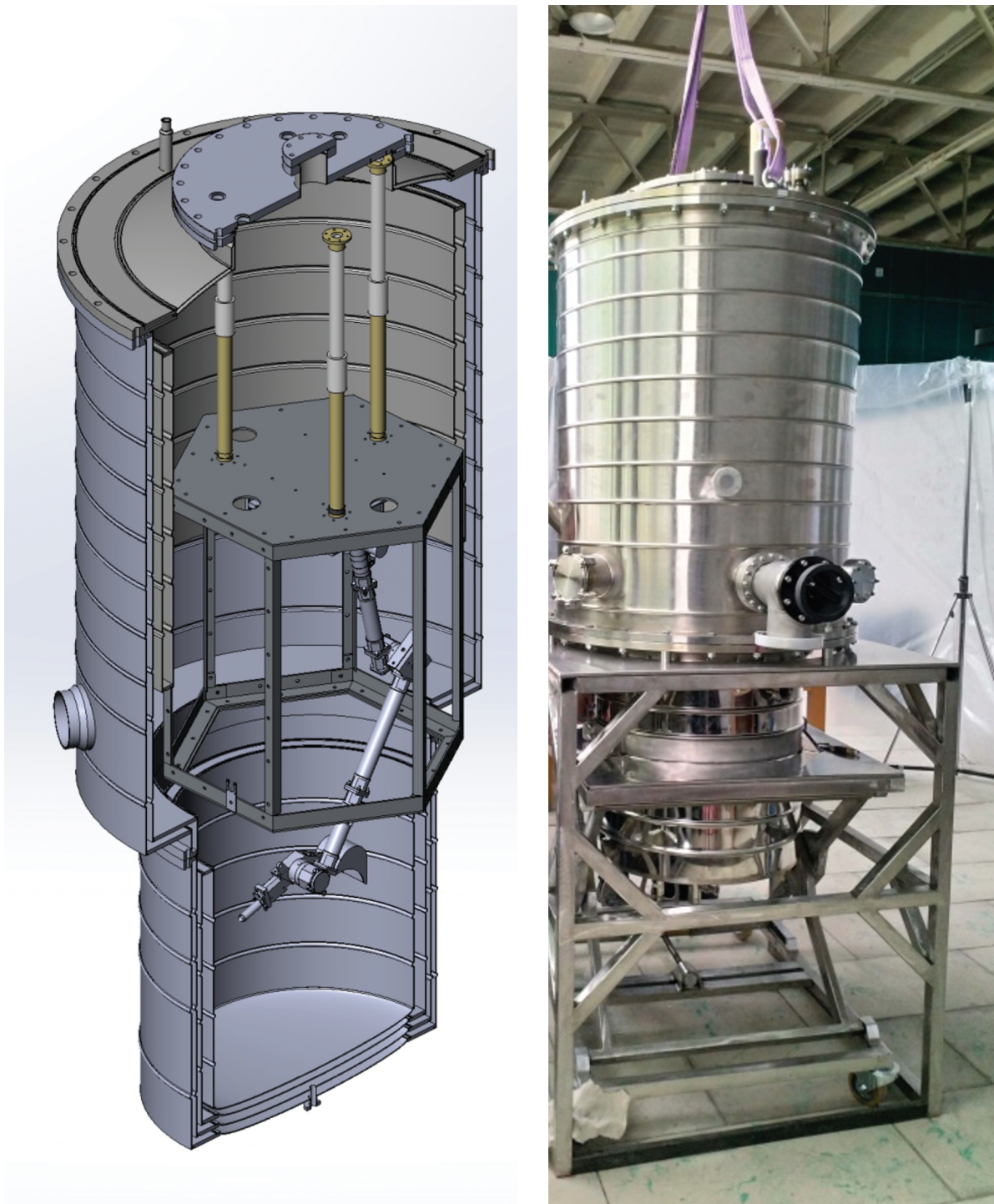


Рис. 11. Фото КВС и его внутренняя структура.

имеет очень низкие прочностные характеристики и обладает высокой сжимаемостью. При уплотнении грунта происходит увеличение сцепления и угла внутреннего трения, резко уменьшается коэффициент сжимаемости и увеличивается прочность грунта. Известно, что плотность поверхностных слоев лунного грунта составляет около

1.3 г/см^3 , возрастая до 1.8 г/см^3 на глубинах более 50 см (Carrig и др., 1991). В связи с тем, что трудно в точности воспроизвести степенной закон, по которому меняется плотность с глубиной, то, как правило, создают инженерные модели лунного грунта, в которых модельные параметры измеряются в рыхлом (не уплотненный грунт) и в

Расположение термодатчиков МИТ8 в криоконтейнере КВС-ГЗУ

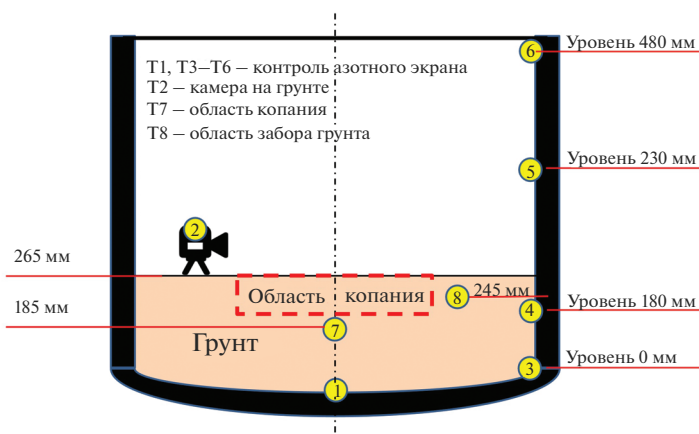


Рис. 12. Схема размещения термодатчиков в криоконтейнере в зоне копания.

уплотненном состоянии. Исходно для испытаний ЛМК был подготовлен аналог лунного грунта в рыхлом состоянии с плотностью 1.5 г/см^3 . С учетом требований, предъявляемых, к работе ЛМК Луны-25 на поверхности (копание лунного грунта до глубины $\sim 25 \text{ см}$) было решено следовать наиболее консервативному подходу, создавая наибольшие усилия при копании, и поэтому использовать максимально уплотненный аналог лунного грунта с плотностью $\sim 1.9 \text{ г/см}^3$ (таблица). Прочность и сцепление (когезия) такого грунта превышают верхние оценки прочности лунного грунта, позволяя моделировать в КВС наиболее неблагоприятный сценарий работы ЛМК.

Кроме плотности, сцепления и прочности лунного грунта также моделировался гранулометрический состав лунного грунта (распределение частиц различного размера). В качестве компонентов для создания грунта-аналога, для имитации тонкозернистой пылеватой фракции были выбраны золы, для имитации полидисперсного компонента с высоким содержанием стекла были взяты доменные шлаки, а для имитации мелкообломочной песчаной фракции с характерными размерами $0.5\text{--}1.0 \text{ мм}$ был использован дробле-

ный кварцевый песок (Slyuta и др., 2021). Эти компоненты смешивались в разных пропорциях, чтобы добиться соответствия с гранулометрическим составом лунного реголита. Были измерены физико-механические свойства получившегося аналога лунного грунта (ЛГА-1), наиболее важные из которых представлены в таблице.

В грунте-аналоге ЛГА-1 был не только подобран гранулометрический состав, но также учтена морфология (форма) лунных частиц. В уплотненном состоянии он характеризуется высоким сцеплением (когезией), и соответственно, как и лунный грунт хорошо держит стенки вырытой траншеи, а также обладает способностью слипаться при механическом воздействии и разрушении.

Как уже упоминалось выше при подготовке к испытаниям сухой грунт максимально уплотнялся с добавлением различного содержания воды. В итоге были созданы несколько типов грунтов, для которых содержание воды менялось от 0.1 до 1.5% по массовой доле, а плотность — от 1.87 до 1.65 г/см^2 .

Основные физико-механические свойства лунного грунта и грунта-аналога ЛГА-1

Свойство	Лунный грунт*	ЛГА-1 рыхлый	ЛГА-1 плотный
Плотность, г/см^3	1.3–1.9	1.50	1.93
Удельная плотность, г/см^3	2.3–3.2	2.56	2.56
Пористость, %	58–32	41.30	24.72
Прочность грунта на сдвиг, кПа	0.1–8.0	0.39	12.00
Сцепление (когезия), кПа	0.1–3.5	0	11.00

* (Слюта и др., 2014).



Рис. 13. Установка ТО-1 ЛМК внутри КВС. Вид сверху. Показан ЛМК в раскрытой конфигурации, предназначенной для копания аналога лунного реголита. Также видна поверхность грунта и емкость для выгрузки забранных образцов грунта.

Работа с аналогом лунного грунта

В ходе работ с ЛМК в КВС было проведено несколько испытаний, для которых подготавливался аналог лунного грунта с разным содержанием воды. Для первого испытания был выбран сухой грунт с содержанием воды не более 0.1% по массовой доле. В последующих испытаниях были использованы грунты с более высоким содержанием воды в диапазоне 0.5–1.5%. Аналог лунного грунта замораживался в КВС до температур ниже, чем -100° в окрестности зоны копания. Во время испытаний давление внутри КВС поддерживалось на уровне ниже 10^{-2} мм рт. ст.

Действия ЛМК во время испытаний моделировали его работу на поверхности Луны. На первом этапе осуществлялся вывод ЛМК в зону копания и производилась проверка твердости грунта. На следующем этапе выполнялось копание грунта на глубину ~ 7 см, и производился забор грунта. Для этого использовалась циклограмма работы с твердым грунтом с минимальным шагом по глубине, составляющим 1.125 см. В силу ограниченного объема внутри криоконтейнера испытание включало копание одной траншеи за шесть погружений ковша. После каждого погружения выкопанный грунт выгружался рядом с траншеей. После 4-го и 6-го погружений производился тестовый забор грунта, который высыпался в разные приемные емкости. Таким образом, максимальная глубина, с которой забирался грунт, составила 12 см (глубина траншеи + длина приемной трубки грунтозаборника).

По мере повышения содержания воды льдом заполнялись поры в грунте. В результате существенно возрастала его твердость и соответствен-

но увеличивалось усилие на приводы ЛМК при копании. На видеозаписи испытаний было хорошо видно, как грунт, насыщенный водяным льдом, терял свою рассыпчатость и образовывал агломерации (см. рис. 13).

В процессе испытаний регистрировался ток потребления ЛМК, который, в свою очередь, пересчитывался в усилие на двигателе задействованного привода, а затем — в усилие, с которым ковш ЛМК воздействовал на грунт. Основная нагрузка пришлась на привод запястья. Пересчет показал, что усилие возросло от 80 Н для сухого грунта до 330 Н для грунта с содержанием воды 1.25–1.5%. Усилие также возрастало и при заглублении ковша. Так, наименьшая нагрузка регистрировалась во время первого погружения ковша, а наибольшая (рост до двух раз) на глубине 4–6 см. Это связано с тем, что самый верхний слой грунта был более сухой, чем нижние слои (потери воды при захолаживании криоконтейнера). На рис. 14 показано, как менялась скорость привода запястья во время последовательных погружений ковша в аналог лунного грунта, в который был добавлен 1% воды по массовой доле.

На этом рисунке хорошо видно падение скорости вращения привода на 10–30% при заглублении ковша. Для грунта с содержанием воды до 1% это не оказывало существенного влияния на движение приводов ЛМК, но с увеличением содержания воды до 1.5% падение скорости вращения приводов во время копания превышало 50%, что стало приводить к срабатыванию датчиков защиты по скорости (падение реальной скорости более чем в два раза ниже заданной в течение продолжительного времени фиксируется как не-

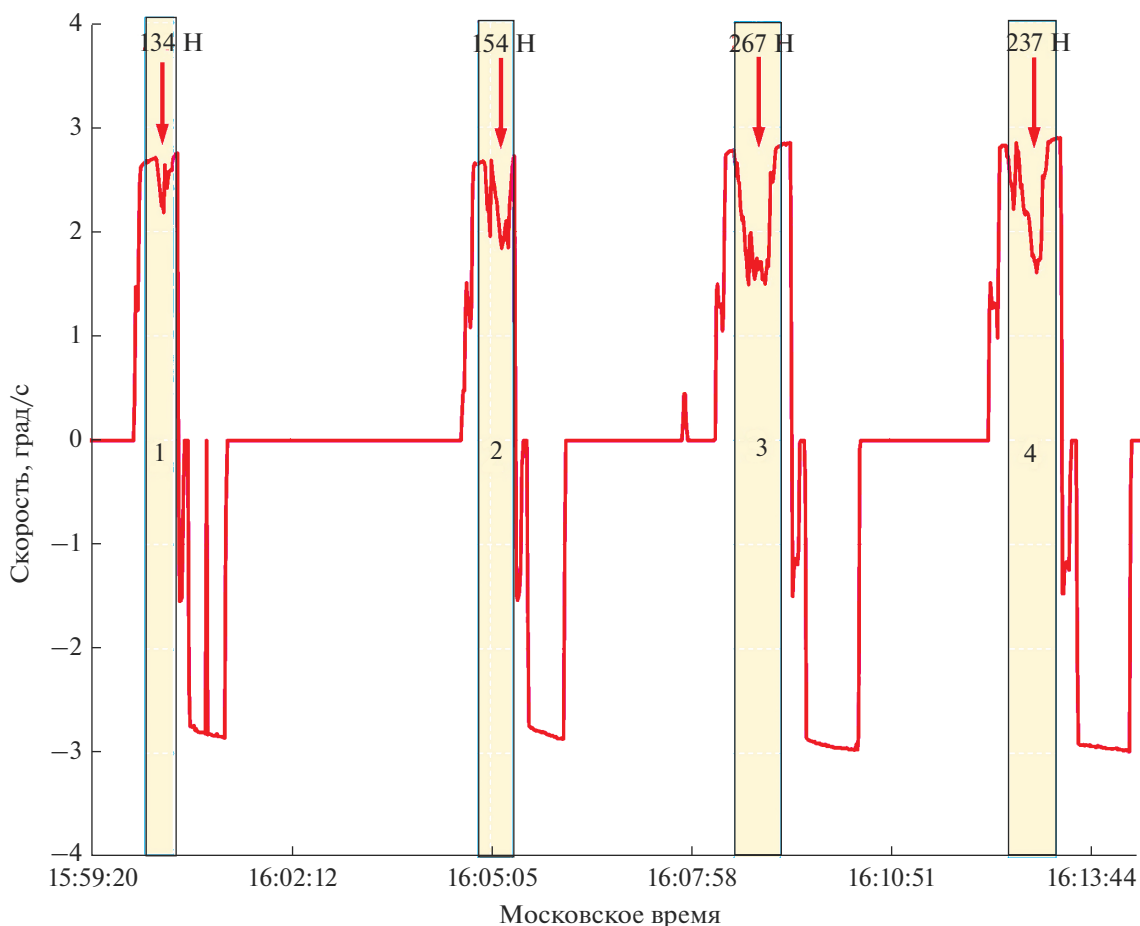


Рис. 14. Скорость привода запястья ЛМК во время копания в КВС. Показаны первые 4 погружения ковша в аналог лунного грунта с содержанием воды 1%. Для каждого погружения показано максимальное усилие на приводе.

штатная работа привода). При срабатывании датчика ЛМК отводился на исходную позицию и процесс копания повторялся еще раз. Для имитации нештатной ситуации на поверхности Луны выполнялось до пяти повторений (см. предыдущий раздел). В нескольких случаях это помогало успешно завершить копание. При содержании воды в 1.5% было установлено, что для успешного завершения процесса копания необходимо выйти за пределы штатного режима работы ЛМК. Потребовалось отключить датчики превышения скорости (разрешить скорости привода падать до нуля на продолжительное время) и максимально повысить порог срабатывания датчиков, измеряющих допустимую перегрузку по току.

Таким образом, можно заключить, что номинальные возможности ЛМК ограничивают процесс копания, если в лунном грунте будет более 1.5% воды по массовой доле. Это очень высокая граница возможности работы ЛМК по содержанию воды, так как на месте посадки Луны-25 содержание воды по орбитальным данным оценивается как менее чем 0.2% (Дьячкова и др., 2017).

После окончания испытаний производилось открытие вакуумной камеры, измерение глубины вырытой траншеи и определение массы и объема забранного грунта. Масса собранных образцов варьировалась от испытания к испытанию в диапазоне от 2 до 5 грамм (1–3 см³). Объем собранных в ходе испытаний образцов реголита, с большим запасом превышает объем, необходимый для заполнения приемного окна лазерного ионизационного масс-спектрометра ЛАЗМА-ЛР.

ВЫВОДЫ

Подводя итоги проделанных наземных испытаний с различными образцами ЛМК можно заключить следующее:

- 1) Функциональные испытания подтвердили, что разработана легкая и надежная конструкция ЛМК с достаточными функциональными возможностями для задач исследований проекта Луна-25.
- 2) В ходе функциональных испытаний было показано, что благодаря использованию стереокамер СТС-Л можно построить трехмерную мо-

дель рабочей зоны ЛМК; точно связать системы координат СТС-Л и ЛМК и по стереофотографиям поверхности Луны прицельно выбирать различные места копания и забора грунта в пределах рабочей зоны ЛМК; создать циклограмму движения ЛМК по выходу в заданную точку на поверхности.

3) Во время функциональных испытаний была откалибрована кинематическая схема ЛМК, позволяющая забирать образцы лунного грунта из рабочей зоны ЛМК с различной глубины (до 25 см) в окрестности посадочного аппарата и доставлять их в приемное окно лазерного ионизационного масс-спектрометра ЛАЗМА-ЛР для последующего элементного и изотопного анализа.

4) В процессе наземных функциональных испытаний была разработана методика работы технологического образца ЛМК с аналогом лунного реголита, замороженного до криогенных температур при низком давлении. Было показано, что мощности приводов ЛМК хватает, чтобы многократно копать и забирать пробы мерзлого лунного грунта (в достаточном объеме), замороженного до -100° с содержанием водяного льда не менее 1.5% по массовой доле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ануфрейчик К.В., Титов К.И., Глазкин Д.Н., Дятлов Н.С., Семенов А.В., Тимонин Д.Г., Чулков И.В. БУНИ – блок управления КНА и сбора научной информации // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2021. (в печати).
- Барсуков В.Л. Лунный грунт из Моря Кризисов. М.: Наука, 1980.
- Slyuta E.N. Physical and mechanical properties of the lunar soil (A review) // Sol. Syst. Res. 2014. V. 48. № 5. P. 330–353.
- Дьячкова М.В., Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Санин А.Б. Выбор мест посадки космического аппарата Луна-25 в окрестности южного полюса луны // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 3. С. 204–215.
- Зеленый Л.М., Митрофанов И.Г., Третьяков В.И., Литвак М.Л., Калашников Д.В., Малахов А.В., Прохоров В.Г. Научная программа исследований космического проекта “Луна-25” // Астрон. вестн. 2021. (в печати).
- Казмерчук П.В., Мартынов М.Б., Москатиньев И.В. и др. Космический аппарат “Луна-25” – основа новых исследований Луны // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. Т. 4(34). С. 9–19.
- Козлова Т.О., Литвак М.Л., Зверев Р.С., Носов А.В., Перхов А.С., Третьяков В.И., Яковлев В.А. Лунный манипуляторный комплекс, конструкция и результаты наземной отработки // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2021. (в печати)
- Литвак М.Л., Санин А.Б. Вода в Солнечной системе // УФН. 2018. Т. 188. № 8. С. 865–880. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.04.038277>
- Carrier W.D., Olhoft G.R., Mendell W. Physical properties of the lunar surface // Lunarsourcebook / Eds Heiken G., Vaniman D., French B.M. Cambridge Univ. Press, 1991. P. 475–594.
- Chumikov A.E., Cheptsov V.S., Managadze N.G. Accuracy of analysis of the elemental and isotopic composition of regolith by laser time-of-flight mass spectrometry in the future Luna-Glob and Luna-Resurs-1 missions // Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. P. 288.
- Colaprete A. et al. Detection of water in the LCROSS ejectaplume // Science. 2010. V. 330(6003). P. 463–468.
- Farley K.A., Williford K.H., Stack K.M., Bhartia R. et al. Mars 2020 Mission overview // Space Sci. Rev. V. 216. article id. 142.
- Grotzinger J.P., Crisp J., Vasavada A.R., Anderson R. et al. Mars sScience laboratory mission and science investigation // Space Sci. Rev. 2012. V. 170. P. 5–56.
- Lin Y., Li X., Zhou Y. The Scientific Achievements by Chang'E-4 and the New Lunar Samples Returned by Chang'E-5 // 52nd Lunar and Planet. Sci. Conf., held virtually, 15–19 March 2021. LPI Contribution No. 2548, id. 2779.
- Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V., Chin G. et al. Hydrogen mapping of the Lunar South Pole using the LRO Neutron Detector Experiment LEND // Science. 2010. V. 330. P. 483–486.
- Mitrofanov I., Litvak M., Sanin A., Malakhov A., Golovin D., Boynton W., Droege G., Chin G., Evans L., Harshman K., Fedosov F., Garvin J., Kozyrev A., McClanahan T., Mikhlikh G., Mokrousov M., Starr R., Sagdeev R., Shevchenko V., Shvetsov V., Tretyakov V., Trombka J., Varenikov A., Vostrukhin A. Testing polar spots of water-rich permafrost on the Moon: LEND observations onboard LRO // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. CiteID E00H27.
- Moeller R.C., Jandura L., Rosette K., Robinson M. et al. The Sampling and Caching Subsystem (SCS) for the scientific exploration of Jezero Crater by the Mars 2020 Perseverance Rover // Space Sci. Rev. 2021. V. 217. article id. 5.
- Pieters C.M., Goswami J.N., Clark R.N. et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1 // Science. 2009. P. 568–572. <https://doi.org/10.1126/science.1178658>
- Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L. et al. Hydrogen distribution in the lunar polar regions // Icarus. 2017. V. 283. P. 20–30.
- Slyuta E.N., Grishakina E.A., Makovchuk V.Yu., Agapkin I.A. Lunar soil-analogue for large-scale experiments // Acta Astronautica. 2021. (in press).
- Trebi-Ollennu A., Kim W., Ali K., Khan O., Sorice C., Bailey P., Umland J., Bonitz R., Ciarleglio C., Knight J., Haddad N., Klein K., Nowak S., Klein D., Onufer N., Glazebrook K., Kobeissi B., Baez E., Sarkissian F., Badalian M., Abarca H., Deen R.G., Yen J., Myint S., Maki J., Pourangi A., Grinblat J., Bone B., Warner N., Singer J., Ervin J., Lin J. In-Sight Mars Lander Robotics Instrument Deployment System // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. P. 93.
- Vasavada A.R. et al. Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits // Icarus. 1999. V. 141. P. 179–193.
- Watson K., Brown H., Murray B. On possible presence of ice on Moon // J. Geophys. Res. 1961. V. 66. P. 1598–1600.