

УДК 520.6

ГЛУБИННЫЕ ГРУНТОЗАБОРНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ БУДУЩИХ РОССИЙСКИХ ЛУННЫХ ПОЛЯРНЫХ МИССИЙ

© 2020 г. М. Л. Литвак^а, * А. В. Носов^а, Т. О. Козлова^а, В. И. Михальский^а,
А. С. Перхов^а, В. И. Третьяков^а

^аИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 07.11.2019 г.

После доработки 04.12.2019 г.

Принята к публикации 13.01.2020 г.

В статье представлен обзор как ранее использовавшихся лунных глубинных грунтозаборных устройств (ГГЗУ), так и новых прототипов таких устройств, разработанных для исследования лунного полярного реголита в рамках будущих лунных проектов, а также рассмотрены различные по техническим параметрам и компоновочным решениям варианты ГГЗУ, предназначенных для будущих российских лунных миссий.

Ключевые слова: Луна, полярные области, криогенное бурение, летучие вещества

DOI: 10.31857/S0320930X20030081

ВВЕДЕНИЕ

Возвращение человека на Луну и создание постоянной действующей лунной базы, что сегодня активно обсуждается и общественностью, и космическими агентствами разных стран является сейчас одним из наиболее вероятных и прорабатываемых вариантов космической экспансии за пределы Земли. В связи с близостью нашего спутника можно не только отрабатывать различные сценарии пребывания человека в космическом пространстве, готовясь к длительным экспедициям на Марс, но и начать разрабатывать на коммерческой основе лунные ресурсы. Последнее даже получило специальный термин *In Situ Resource Utilization* (ISRU) (Anand и др., 2012; Crawford, 2015). В список наиболее востребованных лунных ресурсов входят водород, кислород (входящие в состав летучих соединений, включая воду), различные металлы и их соединения, необходимые для обеспечения астронавтов воздухом, водой, ракетным топливом и материалами для создания лунной базы (Anand и др., 2012; Crawford, 2015). При этом отмечается высокая важность и необходимость исследований природной среды на лунных полюсах, анализа состава лунного полярного реголита для выяснения условий происхождения и эволюции Солнечной системы, обнаружения водяного льда и сложных молекулярных соединений и уточнения запасов ресурсов планируемых к использованию до начала освоения Луны и построения лунной базы.

Наиболее популярными сейчас районами посадки автоматических космических аппаратов (КА) и, в будущем, пилотируемых станций являются полюса и высокоширотные области Луны (в большей степени это относится к южному полюсу), где находятся вечно затененные кратеры, в которых могли сохраняться огромные отложения различных летучих веществ и прежде всего водяного льда (см. также главу “Летучие соединения...”). С научной точки зрения исследование номенклатуры летучих веществ, их изотопного состава (прежде всего отношение D/H) может помочь ответить на вопрос о происхождении водяного льда (вода, возникшая в лунном реголите под воздействием солнечного ветра, эндогенная вода, лед, принесенный кометами и астероидами) и пролить свет как на происхождение системы Земля–Луна, так и на эволюцию всей солнечной системы (Литвак, Санин, 2018). При этом, с точки зрения будущего освоения, изучение наиболее обогащенных водяным льдом районов может указать место оптимального расположения будущей лунной базы.

Как правило “полезные ископаемые” (это в полной мере относится и к залежам водяного льда в высокоширотных областях Луны) распределены крайне неоднородно, находятся в приповерхностном слое на разной глубине. Их обнаружение требует использования как дистанционных методов поиска с помощью средних и тяжелых луннодромов, способных проводить геологоразведку, так и применения оборудования, предназначенного

для извлечения проб лунных ресурсов – буровые установки и грунтозаборные устройства.

В связи с этим при планировании будущих автоматических лунных миссий с наиболее высоким приоритетом рассматривается разработка глубинных грунтозаборных устройств (ГГЗУ), позволяющих извлекать с разной глубины, хранить и транспортировать пробы лунного вещества для их упаковки перед доставкой на Землю или для анализа *in situ* бортовым оборудованием.

Российская лунная программа предполагает, что за Российской Федерации должны быть закреплены наиболее привлекательные плацдармы на Луне с высокими энергетическим и ресурсным потенциалами. Впоследствии они будут использованы для создания Лунной базы. Реализация такого подхода сначала предусматривает исследование Луны с помощью автоматических станций, которые должны постепенно решать поставленные задачи, переходя от научно-исследовательских запросов к промышленно-технологическим, чтобы служить трамплином для подготовки пилотируемых миссий. Сейчас эта идеология реализуется в текущей Федеральной космической программе (ФКП) до 2025 г. и будет продолжена в следующей ФКП на период с 2026 по 2035 гг.

На первом этапе российской лунной программы основная роль отводится посадочным миссиям Луна-25, Луна-27, Луна-28, Луна-29, которые должны быть реализованы последовательно друг за другом с усложнением поставленных задач и используемых технологий. В их научные задачи входит изучение минералогического, химического, изотопного состава лунного реголита, а также поиск летучих соединений (в том числе водяного льда и органических соединений) в приповерхностном слое реголита полярных областей Луны. В каждой из этих миссий предусмотрено взятие образцов грунта с различных глубин, как с помощью манипуляторов, так и с применением полноценного ГГЗУ и доставка их на борт КА для анализа разносторонними методами с помощью бортовых научных аналитических приборов.

Проект Луна-25 (Опытно-конструкторская работа (ОКР) Луна-Глоб) является первой российской лунной посадочной миссией, запуск которой намечен на 2021 г. Последняя успешная посадка (КА Луна-24) была осуществлена СССР в 1976 г., основным достижением которой было бурение на глубину около 2.4 м, дальнейший забор и возвращение около 200 г лунного реголита (с сохранением стратиграфии) на Землю для дальнейшего исследования (см. Барсуков, 1980). В задачи Луны-25 входит отработка методов мягкой посадки в данных широтах, исследование лунной поверхности и окружающих условий в высок широтных районах более 70° ю.ш. (см. Долгополов и др., 2011; Дьячкова и др., 2017). Для исследования

свойств лунного реголита в миссии Луна-25 будут использованы бесконтактные (фотосъемка, инфракрасная, нейтронная и гамма спектроскопия) и контактные (взятие верхнего слоя реголита и его последующий масс-спектрометрический анализ) методы.

Посадка КА Луна-27 (ОКР Луна–Ресурс-1) планируется на 2024–2025 гг. в окрестности южных полярных широт (80° с.ш.). На КА предполагается осуществить гораздо большее количество научных исследований: исследование экзосферы (измерение потоков заряженных и нейтральных частиц) и пылевой обстановки, изучение внутреннего строения Луны, элементный, минералогический и изотопный анализ лунного реголита. Большое значение придается поиску летучих веществ и подповерхностного водяного льда, которые могли сохраниться в толще лунного грунта в течение миллиардов лет даже в освещенных полярных районах на глубине до 1 м (Mitrofanov и др., 2012; Sanin и др., 2017). Для этого будет использован целый комплекс научной аппаратуры, разрабатываемый в тесном сотрудничестве с Европейским космическим агентством (ESA) и включающий ГГЗУ (с глубиной бурения более 1 м), манипуляторный комплекс для передачи образцов грунта и несколько аналитических приборов (масс спектрометры, хроматографический комплекс) для анализа этих образцов (Carpenter, Fisackerly, 2017). Основная цель проекта – криогенное взятие лунного грунта с глубины, где могут сохраниться летучие соединения, включая воду, с минимальным температурным воздействием, чтобы максимально избежать сублимации летучих веществ из образца в процессе его взятия и передачи на анализ.

Проекты ФКП Луна-28 и Луна-29 находятся еще на начальной стадии определения концепций миссий и основных научных задач и выработки предложений по составу комплекса научной аппаратуры. Стратегически, первая из этих миссий будет посвящена глубинному криогенному бурению лунного реголита в полярных широтах и доставке полученных образцов на Землю. Вторая миссия предполагает создание тяжелого лунохода для проведения геологоразведки прилегающей территории и, возможно, совместную работу с пилотируемой экспедицией (находящейся на орбитальной станции на орбите искусственно-го спутника Луны).

Успешная реализация первых российских миссий требует использования современных технологий бурения и извлечения образцов грунта, но адаптированных к лунным условиям, что может использоваться в дальнейшем для создания технологий добычи и извлечения лунных полезных ископаемых.

В настоящей работе представлен обзор существующих лунных ГГЗУ, а также изучены их основные научные задачи и вытекающие из них технические характеристики ГГЗУ для разных лунных посадочных миссий.

ЛЕТУЧИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Летучие вещества, сформировавшиеся вместе с Луной или принесенные на нее извне и сохранившиеся с доисторических времен, могут многое сказать об истории возникновения Луны, и эволюции Солнечной системы в целом. Кроме этого, летучие вещества, и в особенности водяной лед, могут рассматриваться как необходимая ресурсная составляющая для поддержания постоянного пребывания астронавтов на поверхности Луны.

Можно выделить несколько ключевых вопросов, связанных с присутствием летучих веществ в верхнем слое реголита на Луне, которые требуют ответа:

- 1) Как распределены летучие вещества на поверхности Луны?
- 2) Каков их химический и изотопный состав?
- 3) Что является их основным источником/источниками?
- 4) Когда они были доставлены на Луну?
- 5) Что они могут сказать нам о происхождении системы Земля—Луна?
- 6) Можно ли их рассматривать как лунные ресурсы, достаточные для обеспечения постоянных лунных баз или, более глобально, как источник полезных ископаемых, доставляемых на Землю?

Сейчас наиболее популярной и обсуждаемой гипотезой образования Луны считается гигантское столкновение молодой Земли и протопланеты размером с Марс произошедшее на ранних стадиях эволюции Солнечной системы (Canup, Asphaug, 2001). Долгое время полагали, что поглощавшая часть летучих веществ, включая воду, осталась на Земле, а Луна превратилась в “сухое” небесное тело со средним содержанием воды порядка 50 ppm (Fegley, Swindle, 1993). Это подтверждалось ранними результатами анализов образцов, привезенных с Луны американским астронавтами в ходе реализации программы Apollo. Однако в последние годы ситуация кардинально изменилась — в дополнительных исследованиях доставленных образцов было обнаружено, что в вулканических стеклах, привезенных Apollo-17, содержание воды может доходить до 750 ppm (Saal и др., 2008). Впоследствии это открытие было подтверждено современными орбитальными измерениями пирокластической породы, находящейся в лунных морях, в которой содержание воды может доходить до нескольких сотен ppm (Milliken,

Li, 2017). Последние теоретические модели гигантского столкновения также показывают, что содержание воды в недрах Луны после завершения формирования Луны может быть достаточно большим (Hauri и др., 2015).

Сейчас наиболее привлекательными местами, где на поверхности Луны мог сохраниться водяной лед и другие летучие вещества, являются полярные кратеры, куда не попадает прямой солнечный свет, а температура может опускаться до нескольких десятков кельвинов (см., например Watson и др., 1999), формируя внутри кратеров холодные ловушки. Источники поступления летучих веществ в реголит могут быть совершенно разные. Это могут быть столкновения с кометами, которые приносят из внешних областей Солнечной системы водяной лед и минералы с высоким содержанием связанной воды. В результате столкновения кометы образуется локальная временная атмосфера, а молекулы летучих и воды (под действием теплового движения и гравитации Луны) могут мигрировать к полюсам и навсегда оседать в холодных ловушках. Аналогичный процесс происходит при взаимодействии протонов солнечного ветра с поверхностью Луны. В результате соударений могут образоваться молекулы воды или гидроксильная группа OH, которые, выйдя из поверхности за счет перемешивания под воздействием метеоритной бомбардировки, могут также мигрировать к лунным полюсам и оседать в холодных ловушках (Crider, Vondrák, 2000). Наконец, вулканическая активность, имевшая место 3.8 млрд лет назад, могла выбрасывать огромное количество газов из недр Луны и даже образовывать временную атмосферу с плотностью до 1–6% от земной (Needham, Kring, 2017). Конденсация летучих веществ и водяных паров из такой атмосферы также могла приводить к насыщению холодных ловушек водяным льдом и другими летучими веществами. Все это позволяет говорить о том, что на Луне в верхнем слое реголита могут присутствовать несколько типов воды — внутренняя (из недр), экзогенная (привнесенная извне кометами и астероидами) и солнечная (образовывающаяся под воздействием солнечного ветра).

Удивительно, но теория холодных ловушек была проверена не на Луне, а на Меркурии. В ходе миссии NASA MESSENGER было проведено детальное картографирование рельефа с помощью фотосъемки с высоким разрешением и лазерной альтиметрии поверхности. Были отождествлены полярные кратеры, куда никогда не попадает солнечное излучение, и было показано, что их расположение точно совпадает с картиной наземной радиолокации Меркурия (Paige и др., 2013). Последняя обнаружила яркие области, проинтерпретированные как отражение от водяного льда,

находящегося либо на поверхности, либо на небольшой глубине на дне этих кратеров.

Для Луны картина оказалась более сложная. В ходе орбитальной миссии NASA Lunar Prospector с использованием нейтронной спектроскопии поверхности было обнаружено скопление водородсодержащих соединений на полюсах (Feldman и др., 1998). Его не удалось сопоставить с крупными полярными кратерами, так как пространственное разрешение американского нейтронного детектора было недостаточное. Первые наблюдения радиолокации с борта миссии NASA Clementina также сначала интерпретировались как скопление водяного льда внутри полярных кратеров, но затем были опровергнуты данными наземных наблюдений (Simpson и др., 1999). Лишь относительно недавно удалось показать, что радиолокация выявляет аномальные кратеры (по коэффициенту круговой поляризации), где может содержаться водяной лед, но далеко не все холодные ловушки попадают в этот список (Patterson и др., 2017). В 2009 г. была запущен орбитальный аппарат NASA Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). На его борту находятся несколько приборов, которые обеспечивают глобальное картографирование Луны в различных диапазонах. Это российский нейтронный спектрометр с высоким пространственным разрешением (прибор ЛЕНД), лазерный альтиметр LOLA, инфракрасный спектрометр Diviner, ультрафиолетовый спектрометр LAMP, бистатический радар Mini-RF и камеры LROC с высоким (сотни метров) разрешением. Картографирование лунной поверхности, проведенное осенью 2009 г., выявило несколько полярных кратеров с повышенным содержанием водорода/водяного льда. Один из них, кратер Кабео, был выбран для баллистической бомбардировки, в ходе которой тяжелый разгонный блок космического аппарата LRO был перенаправлен в центр этого кратера. Выброшенное в результате взрыва облако газа и пыли было исследовано орбитальными спектрометрами на борту LRO, измерения которых показали наличие различных летучих веществ, в том числе водяных паров, концентрация которых соответствовало наличию в поверхностном слое реголита водяного льда с массовой долей доходящей до 5% (Colaprete и др., 2010). Это совпало с данными последующей нейтронной спектроскопии, проведенной с орбиты, показавшей, что в этом кратере на глубине до полуметра может находиться от 1 до 10% водяного льда (Sanin и др., 2017).

К сожалению, не все полярные кратеры демонстрируют подобные особенности. В ряде случаев водородный сигнал либо отсутствует, либо он обнаруживается только в освещенной окрестности кратера (Mitrofanov и др., 2012). Сопоставление карт экспериментов Diviner (карта возможного залегания водяного льда по анализу температуры

поверхности), ультрафиолетового спектрометра LAMP (поиск поверхностного водяного льда по интенсивности линий водорода Ly α) и нейтронного спектрометра LEND (поиск водяного льда на глубине до 1 м по вариациям нейтронного альбедо) показывает как сходства, так и различия (Hayne и др., 2015; Sanin и др., 2017). Это указывает на гетерогенное распределение водяного льда как по поверхности, так и по глубине.

Возможно, водяной лед накапливался в кратерах, которые были вечнозатененными только на ранней Луне, а сейчас это свойство утратили. В результате глобального перераспределения масс на раннем этапе эволюции Луны ее ось вращения могла сместиться, что привело к соответствующему смещению полюсов. Косвенно на это указывает отсутствие явных признаков водорода/водяного льда в самых полярных кратерах. Кроме того, симметричность расположения водородонасыщенных северной и южной областей, отстоящих от полюсов, но лежащих вдоль одной оси, подтверждает эту теорию (Siegler и др., 2016).

Вечнозатененные полярные кратеры, как кладовая разнообразных летучих веществ накопленных за миллиарды лет, безусловно, являются наиболее привлекательными в качестве мест посадок будущих миссий. Однако, они находятся на высоких широтах, а доступ к ним затруднен. В них не попадает солнечный свет, отсутствует радиосвязь, а температуры близки к абсолютному нулю. Поэтому с инженерной точки зрения рассматриваются различные компромиссные варианты: например, посадка лунохода рядом с таким кратером с возможностью последующего кратковременного визита внутрь кратера, или выбор мест посадок стационарных аппаратов среди приполярных освещенных районов, где лед мог сохраниться на некоторой глубине.

Орбитальные наблюдения показывают, что такие перспективные районы существуют. Чтобы водяной лед неограниченное время сохранялся непосредственно на лунной поверхности, требуется очень низкие температуры порядка 110 К. В этом случае скорость сублимации будет составлять всего 1 мм за миллиард лет (Zhang, Paige, 2009). При более высоких температурах, например, 150 К, поверхностный слой водяного льда толщиной 1 м может сублимировать всего за 1000 лет (Paige и др., 2013). Для других летучих веществ (CO₂, NH₃, некоторые органические соединения) температуры консервации должны быть еще ниже. Таким образом, первоначально образовавшийся водяной лед может сохраниться, только если он будет экранирован от внешних условий верхним слоем сухого реголита толщиной более 10 см. Это может произойти в результате микрометеоритного перемешивания верхнего слоя лунной поверхности, который и может защитить нижние слои и

создать условия для сохранения в них летучих и воды. С помощью орбитальных наблюдений, основанных на нейтронной спектроскопии, данных наземных и орбитальных радарных исследований, такие залежи можно локализовать с точностью до небольших районов, а посадочные миссии и, прежде всего, луноходы уже могут непосредственно исследовать эти районы и взять пробы для проведения элементного и изотопного анализа. Суточные вариации температуры лунной поверхности имеют большую амплитуду, доходящую до нескольких сотен градусов от ~ 50 К ночью и до ~ 250 К в полдень на высоких широтах. Однако на глубине более полуметра температура становится стабильной и по данным инфракрасной съемки можно определить районы, где водяной лед может сохраняться на доступной для исследований глубине. Это означает, что будущие посадочные миссии должны иметь возможность глубинного бурения до глубин 1–2 м, а сам механизм бурения, взятия проб и их передачи в аналитические приборы должен носить малоинвазивный характер. В процессе бурения и доставки образца грунта в аналитические приборы необходимо максимально сохранить естественные температурные условия его пребывания в толще грунта. Такой тип бурения, как правило называют криогенным, поскольку изъятый из грунта образец должен быть доставлен при очень низких температурах, чтобы предотвратить сублимацию летучих веществ. Подобные методы бурения еще не применялись в планетных исследованиях и для их реализации требуется разработать специальные типы буровых устройств. В следующей главе представлен обзор существующих ГЗУ, обеспечивающих глубинное бурение до 1–2 м и которые могут рассматриваться в качестве прототипов для создания будущих криогенных ГЗУ.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ГЗУ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПЛАНЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Луна и Марс – это наиболее интенсивно исследуемые объекты Солнечной системы на протяжении многих десятилетий. За это время были успешно реализованы десятки научных орбитальных и посадочных миссий и практически в каждой с высоким приоритетом ставилась задача детального изучения свойств (механических, тепловых, электромагнитных) и состава (геологического, химического, элементного и изотопного) приповерхностного слоя грунта. Дистанционные методы (фотосъемка, инфракрасная и ультрафиолетовая спектрометрия, нейтронная и гамма-спектроскопия, радарные измерения и т.п.) обладают разной проникающей способностью от нескольких микрон до километров, но все равно не предоставляют полной картины и требуют

дополнительной верификации и уточнения, что может быть обеспечено только взятием и всесторонним анализом проб грунта с разной глубины. Поэтому еще на ранних этапах, на автоматических посадочных миссиях, начиная с американских марсианских *Viking-1* и *-2* и заканчивая аппаратами советской программы Луна, использовались буровые устройства, позволяющие заглубляться на несколько десятков сантиметров или первые метры и забирать грунт либо для анализа на борту посадочных станций, либо для возврата на Землю.

В целом, грунтозаборные устройства, основываясь на глубине их проникновения в подповерхностные слои исследуемого грунта, можно разделить на 4 группы.

1 группа – это поверхностные ГЗУ. Они способны проникать в грунт на глубину от 1 до 10 см. Сегодня это самый распространенный тип ГЗУ. В список таких ГЗУ попадают как устройства ковшового типа, так и устройства, использующие буровой инструмент. Они очень удачно вписываются в состав манипуляторных комплексов, устанавливаемых на планетоходы или посадочные платформы. Их основное преимущество состоит в простоте конструкции, минимальном энергопотреблении, небольшой массе и возможности производить отбор проб различных механических свойств (от рассыпчатого до твердого грунта) в различных местах около КА. В качестве примера можно привести миссии NASA *Phoenix* и *MSL/Curiosity*. В ходе первой миссии был проведен только ковшовый забор самого верхнего слоя марсианского грунта (Smith и др., 2008). Во втором случае – это использование ковшового устройства и бура в составе манипулятора тяжелого марсохода (Anderson и др., 2012). В 2012 г. марсоход *Curiosity* осуществил первое бурение на поверхности Марса, заглубившись на глубину порядка 6 см. На сегодняшний момент таких бурений сделано около двух десятков вдоль трассы движения марсохода.

2 группа – глубинные ГЗУ (ГГЗУ), предназначенные для бурения на глубины 1–3 м. Это уже более сложные и массивные устройства, являющиеся одним из главных элементов научной аппаратуры на борту посадочного аппарата. Для проходки на такие глубины уже используется буровой инструмент, состоящий, как правило, из одной буровой штанги. История таких ГГЗУ начинается с советских миссий *Луна-16* и *Луна-20* (см. детальное описание ниже). К ним можно также отнести перспективные разработки ГГЗУ для миссии NASA *IceBreaker* (Zacny и др., 2013) и российско-европейского проекта *ExoMars-2020* для исследования Марса (Vago и др., 2017), *Resource Prospector* (Zacny и др., 2015) и *ProSEED* (Carpenter, Fisackerly, 2017) для лунных посадочных миссий (см. также детальное описание ни-



Рис. 1. Общий вид марсохода ExoMars-2020.

же). Кроме лунных и марсианских исследований подобное ГГЗУ было установлено в миссии ESA Rosetta и Фобос-Грунт (аналогичные устройства) для исследования ядра кометы Чурюмова–Герасименко и спутника Марса – Фобоса. Именно такие буровые устройства сейчас рассматриваются в качестве основных прототипов будущего криогенного ГГЗУ для лунных исследований.

3 группа – это ГГЗУ, способные производить бурение на глубины от нескольких метров до 10 м. Эти устройства либо состоят из составной буровой штанги, когда отдельные элементы собираются в единую штангу по мере проходки скважины, либо из самозаглубляющегося устройства типа ударного проходчика. Примером является действующая марсианская миссия NASA Insight, в состав которого входит устройство, основанное на ударном механизме внедрения на глубину до 5 м и предназначенное для изучения механических и тепловых свойств подповерхностных слоев Марса (Sprohne и др., 2019). Устройство позволяет произвести необратимую проходку в глубину без возможности возврата из скважины. КА Insight успешно сел на поверхность Марса в конце 2018 г. и уже провел тестовые операции по заглублению на глубину порядка 40 см. Отдаленным аналогом также является ГГЗУ разрабатываемое для марсохода EKA ExoMars-2020, так как в нем должен быть отработан механизм сборки буровой штанги из отдельных колен/звеньев, позволяющий бурить на глубины более 2 м при наличии дополнительных звеньев.

4 группа – ГГЗУ для бурения на глубину более 10 м. Это массивные составные устройства, требующие больших энергозатрат. Они еще существуют только в виде начальных, не детализированных проработок и не применялись в планет-

ных исследованиях. В ближайшем будущем они будут очень востребованы, в том числе для научно-промышленных целей, связанных с поиском ресурсов и полезных ископаемых на других планетах и небесных телах Солнечной системы.

Далее в этой главе более подробно рассмотрены ГГЗУ, позволяющие извлекать пробы грунта с глубин порядка 1–2 м, которые либо уже были успешно использованы в космических экспериментах (миссии к Луне и Марсу), либо в настоящее время для них созданы действующие прототипы или летные образцы, протестированные в различных условиях и готовые к применению в космосе. Сравнительный анализ характеристик таких ГГЗУ, на наш взгляд, позволяет понять, какие из них являются наиболее важными для создания следующего поколения ГГЗУ для будущих лунных автоматических миссий.

Марс. Ключевым элементом второй части российско-европейской миссии ExoMars, планируемой к запуску в 2020 г., на предприятиях ESA создается марсоход с ГГЗУ, которое позволит впервые пробурить скважину в марсианской поверхности на глубину до 2 м. Общий вид марсохода представлен на рис. 1.

Основная задача – добраться до внутренних слоев грунта, скрытых от внешних неблагоприятных радиационных условий и воздействия атмосферы, и где могли сохраниться органические соединения. Проходка на глубину достигается за счет составного бурового инструмента, состоящего из четырех колен по 0.5 м длиной и механизма их автоматическойстыковки, что существенно уменьшает размер ГГЗУ и облегчает его размещение на борту марсохода (см. также рис. 2).

Буровая штанга снабжена внешним шнеком для отвода бурового шлама из скважины и законцовкой с четырьмя резцами. Наконечник бурового инструмента имеет приемную полость для взятия образца, которая открывается и закрывается перемещением специального поршня. При продолжении бурения с открытой полостью внутрь ее попадает проба грунта, после заполнения полость закрывается и производится выемка инструмента из скважины и перегрузка пробы в специальное распределительное устройство (SPDS) для размельчения и последующей передачи в аналитические приборы марсохода (рамановский спектрометр, инфракрасный спектрометр). Буровой инструмент снабжен термодатчиками для контроля температуры бура и грунта, что позволяет обеспечивать такие режимы бурения при низких температурах (до -80°C) и в разреженной атмосфере Марса, чтобы избежать сублимации летучих веществ, прежде всего вкраплений водяного льда. Ожидается, что нагрев образца грунта во время бурения будет не более $5\text{--}20^{\circ}\text{C}$. ГГЗУ также снабжено инфракрасным датчиком (Ma_MISS,

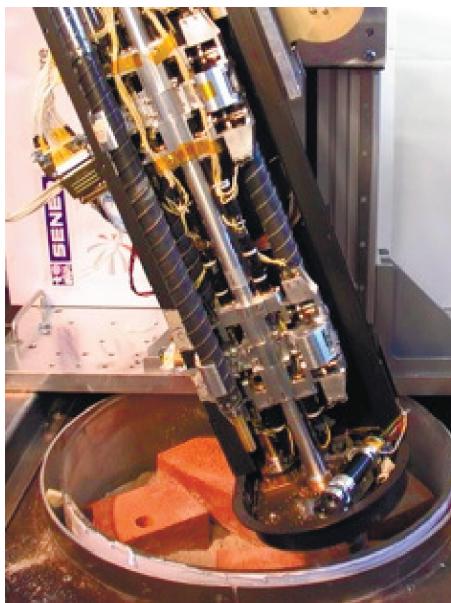


Рис. 2. Общий вид ГГЗУ на марсоходе ExoMars-2020.

ссылка) для проведения спектрометрического анализа минерологического состава грунта вдоль скважины в течение всего процесса бурения. Для проникновения вглубь ГГЗУ снабжено только

вращательным механизмом (скорость вращения 100–300 об./мин) с потреблением порядка 80 Вт и прижимной силой около 100 Н. Объем пробы составляет примерно 2.5 см³ (диаметр 1 см, длина 3 см). Полная масса ГГЗУ вместе с управляющей электроникой составляет 21 кг.

Летный прототип этого ГГЗУ уже протестирован и проверен в различных режимах, включающих бурение и отбор проб с глубины 0.5–2 м, в условиях, приближенных к марсианским по давлению и температуре, с использованием для тестирования стратиграфически различных образцов грунта, включающих также образцы со слоями водяного льда с содержанием воды до 35% по массовой доле. Основным разработчиком ГГЗУ создаваемого по заказу ESA является итальянский машиностроительный концерн Leonardo.

Вторым примером является разрабатываемая фирмой Honeybee Robotics буровая установка IceBreaker, предназначенная для бурения льдоносных грунтов в полярных районах Марса. Общий вид данного ГГЗУ представлен на рис. 3.

Конструктивно и по компоновке данная разработка ГГЗУ предназначена для небольшой околополярной посадочной миссии NASA класса Polar lander, которая уже использовалась для миссий NASA Phoenix и Insight. На данный момент она успешно прошла испытания в термовакуум-

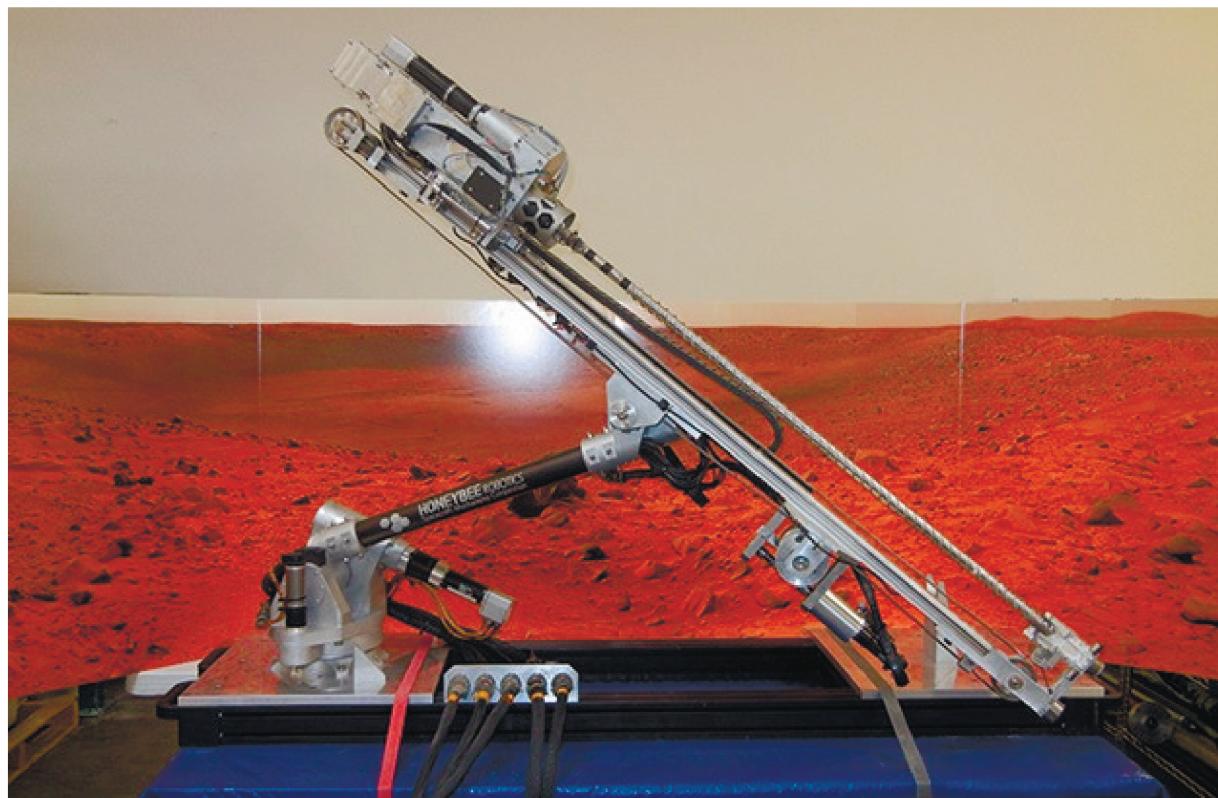


Рис. 3. Общий вид ГГЗУ IceBreaker.

ной камере и в арктических условиях (Заспу и др., 2016а). При разработке этого ГГЗУ был выбран ударно-вращательный механизм внедрения, как наиболее эффективный с точки зрения быстрого проникновения в твердые породы с наименьшими энергетическими затратами. Предусмотрены различные режимы бурения, развивающие максимальную мощность до 350 Вт и предусматривающие усилие прижатия к грунту до 160 Н на базальтовых камнях. В целом данное ГГЗУ можно характеризовать классической формулой 1-1-100-100 или 1 м проходки за 1 ч с мощностью 100 Вт и прижимной силой 100 Н. Последняя определяется реакцией опоры посадочного аппарата. В условиях с низкой гравитацией небольшой посадочный аппарат массой порядка 350 кг существенно ограничивает прижимную силу на уровне не более 300–350 Н. Диаметр бурового инструмента составляет 25 мм при “полезной” длине от 1 до 3.5 м (в случае разных лабораторных образцов). Он также снабжен термопарами для мониторинга температуры грунта при бурении. Данное ГЗУ имеет в своем составе двойную систему перегрузки, рассчитанную как на легкосыпучие, так и на “липкие” образцы. Буровой инструмент выполнен в виде шнека с переменным шагом со сплошным и обьюдоострым резцом из карбида вольфрама на конце бура. Верхняя часть буровой штанги снабжена шнеком с небольшими желобами винтовой поверхности (2 мм) но имеющими высокий угол подъема (30°). Эта часть предназначена для эффективного отвода бурового шлама. Нижняя часть шнека имеет более широкие желоба (6 мм) с небольшим углом подъема (10°). Ее основная задача – забирать пробы грунта из скважины. Резец выполнен из твердого сплава для размельчения очень твердых пород, так как прочность льдонасыщенных грунтов при низких температурах (порядка -100°C) возрастает в несколько раз. В этом ГГЗУ предусмотрено взятие образцов через каждые 10 см по глубине с их доставкой в аналитические приборы. Очистка шнека с образцами породы производится специальным устройством, где вращающиеся щетки счищают грунт с витков шнека в приемное устройство.

В ходе наземных испытаний данная установка была испытана в условиях максимально приближенных к марсианским, беспрепятственно смогла пробурить мерзлый грунт на всей возможной длине (на 1 м по плотным замороженным базальтовым грунтам и на 3.5 м по сплошному льду) и успешно изъять пробы. Наибольшее зафиксированное изменение температуры образцов при воздействии на них бурового инструмента составило 8°C .

Луна. Если до недавнего времени на Марсе было реализовано только поверхностное бурение на глубину менее 10 см (миссия NASA Mars Science Laboratory), то на Луне еще в 20-м веке удалось

провести эксперименты по глубинному бурению и даже доставить образцы породы на Землю. Первые в мире забор и доставка образцов лунного грунта на Землю были осуществлены в рамках советской космической миссии Луна-16. Для этих целей на посадочном модуле было установлено ГЗУ, состоящее из бурового инструмента с системой электрических приводов и механизма выноса бурового инструмента. Механизм выноса представлял собой штангу с приводами, обеспечивающими ее перемещение в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Такие возможности позволяли выбирать место для бурения вблизи аппарата, и производить перегрузку колонки добывшего реголита в возвращаемый аппарат. Буровой инструмент был оснащен системой приводов, обеспечивающей ударно-вращательный способ бурения, преимущества которого состоят в том, что сочетание вращения и ударных нагрузок увеличивают ресурс коронки бурового инструмента и уменьшают вероятность подклинивания керна при колонковом бурении. В результате буровой инструмент имел достаточно большую скорость бурения (в среднем 60 мм/мин) и малое энергопотребление. Коронка бурового инструмента обеспечивала разрушение породы набором твердосплавных резцов, расположенных по диаметру. Вынос выбуренной породы осуществлялся шнековым транспортером, а грунт, оставшийся внутри, поступал в керноприемную полость бурового инструмента. Для отрыва сплошного керна от породы и сохранения сыпучих пород при загрузке в контейнер возвращаемого аппарата входное отверстие коронки бурового инструмента было оснащено специальным кернорвателем и специальными ворсовыми включениями на внутреннем диаметре инструмента, исключающими возможность выпадания керна. После бурения рабочая часть бурового инструмента вместе с керном лунного реголита перегружалась в возвращаемый аппарат и доставлялась на Землю. Максимально достигнутая глубина проникновения составила 350 мм при взятой массе грунта 101 г. Общий вид ГГЗУ Луна-16 представлен на рис. 4, где 1 – корпус ГГЗУ, 2 – привод вращения, 3 – буровой инструмент.

Детальная фотография бурового инструмента представлена на рис. 5.

Посадочный модуль КА Луна-20 оснащался аналогичным ГЗУ, что и Луна-16. Отличие состояло в выборе места посадки, отличавшегося более сложным с точки зрения бурения поверхностным слоем. Результатом миссии стала доставка 55 г лунного грунта на Землю с глубины 340 мм.

Автоматическая межпланетная станция Луна-24 стала последней из серии космических аппаратов советской программы Луна. Она имела в своем составе совершенно новый тип ГЗУ, хотя основная посадочная платформа была заимствована из

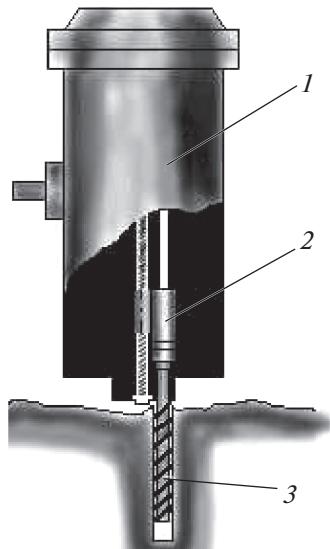


Рис. 4. Общий вид ГГЗУ Луна-16.

миссий Луна-16 и Луна-20. Новое ГЗУ при прежних установочных размерах и энергопотреблении позволило увеличить глубину бурения почти в шесть раз и загрузить пробы грунта, взятые по всей глубине скважины с сохранением их стратификации, в возвращаемый аппарат. ГГЗУ Луна-24 содержало ряд уникальных конструктивных решений, не встречавшихся в космической технике ранее. Бурение скважины производилось колонковым инструментом с вращательным и

вращательно-ударным режимом проходки, при этом колонка грунта при бурении отбиралась в гибкий грунтонос для сохранения стратификации. Затем заполненный грунтом грунтонос укладывался в кассету и перегружался в контейнер возвращающегося аппарата, а ГЗУ автоматически отводилось из зоны старта. Применив совершенно новое решение упаковывания взятой пробы в грунтонос, советские инженеры решили не только проблему перегрузки и доставки образца в возвращаемый аппарат, но и нашли техническое решение, как избежать чрезмерного уплотнения и перемешивания грунта с сохранением его стратификации. При обычном колонковом бурении пробы, проходя через отверстие в буровой коронке, начинает перемешиваться и тормозится за счет сил внутреннего трения, постепенно уплотняясь и забивая грунто-приемную область, что ведет к прекращению процесса взятия грунта уже на небольшой глубине. Специальный гибкий грунтонос подхватывал грунт, проходящий через отверстие буровой коронки, и транспортировал его дальше без перемешивания. В рамках миссии Луна-24 удалось доставить на Землю 170 г грунта с глубины до 2400 мм с сохранением стратификации. Общий виду ГГЗУ Луна-24, установленного на КА, представлен на рис. 6.

К сожалению, после окончания программы Луна на наш спутник больше не летали автоматические посадочные станции снабженные ГГЗУ. К этим планам вернулись только в 21-м веке, при этом уже на основе новых знаний о Луне, концен-

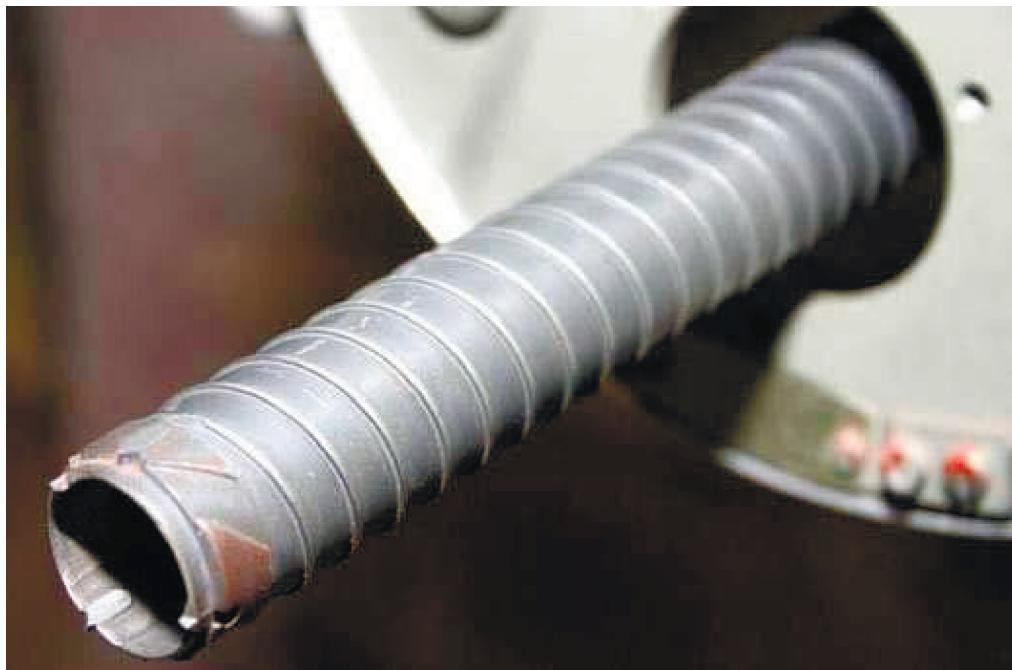


Рис. 5. Общий вид бурового инструмента ГГЗУ Луна-16.

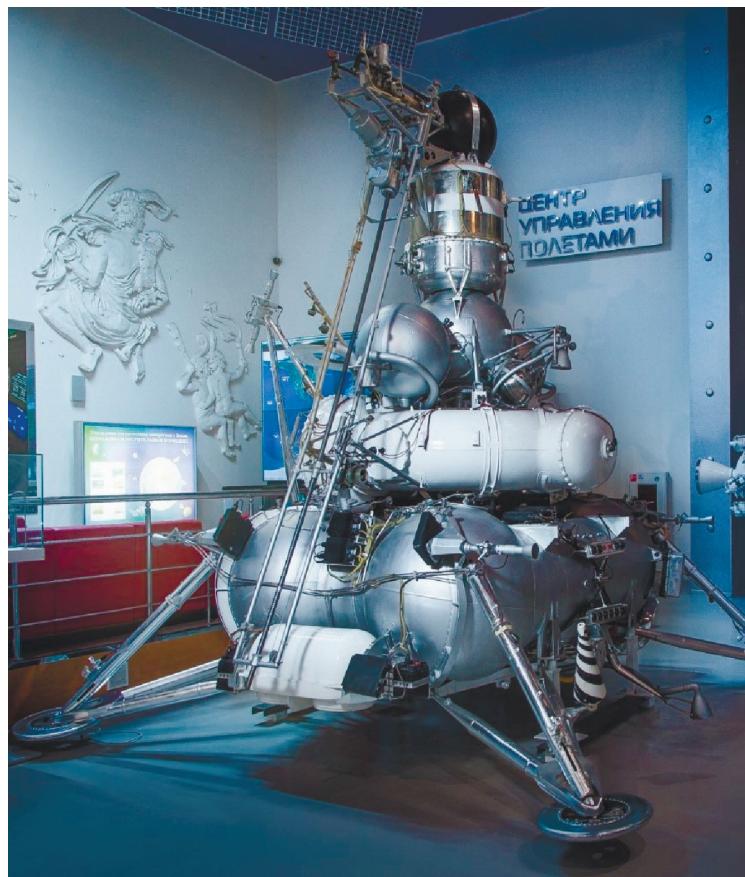


Рис. 6. Общий вид ГГЗУ Луна-24.

трируясь на доставке на Землю образцов реголита из полярных областей. В настоящее время такие посадочные миссии прорабатываются различными космическими агентствами и даже частными организациями и прототипы соответствующих ГГЗУ активно создаются и тестируются в условиях, приближенных к лунным. В качестве наиболее технически проработанного нужно отметить проект ГГЗУ для лунной миссии NASA Resource Prospector. Хотя сама миссия была впоследствии отменена, тем не менее удалось создать действующий концепт ГГЗУ с очень высоким уровнем готовности — в терминах используемого в NASA Technical Readiness Level (TRL) характеризующего уровень разработки аппаратуры, TRL достиг уровня 6 (см. Засуну и др., 2017). В качестве основы была взята уже описанная выше марсианская ГГЗУ IceBreaker (с TRL = 4) и ее следующая версия LITA (TRL = 5). Общий вид ГГЗУ Resource Prospector показан на рис. 7.

Так же, как и IceBreaker, ГГЗУ для Resource Prospector состоит из вращательно-ударного механизма, расположенного в верхней части, единой буровой штанги, внешняя поверхность которой выполнена в виде шнека с переменным ходом витков (точно так же, как у IceBreaker), станции

очистки, использующей щеточный механизм, механизма перегрузки и механизма раскрытия/выноса. Полная масса ГГЗУ составляет 15 кг плюс дополнительные 5 кг, чтобы разместить и закрепить его на борту лунохода. ГГЗУ следует универсальному правилу бурения скважины глубиной 1 м за 1 ч, используя мощность не более 100 Вт и силу прижатия не более 100 Н. При этом было заложено потребление до 300 Вт на ударный механизм (4 Дж на один удар) и столько же на вращение (до 120 оборотов в минуту). Длина буровой штанги составляет около 1200 мм, а ее диаметр равен 1 дюйму, что позволяет забирать примерно 12 см³ лунного грунта в каждой проходке. Максимальный размер ГГЗУ не превышает 1800 мм. Механизм раскрытия/выноса обеспечивает закрепление ГГЗУ на борту лунохода в транспортном положении на высоте 80 см над поверхностью. Разрешенный температурный диапазон для хранения составляет [−233, +70°C], а для работы [−60, +50°C]. Созданное ГГЗУ успешно прошло натурные испытания в Арктике, Антарктиде, Гренландии, и экспериментальные проверки в термовакуумной камере, где были созданы лунные давление 10^{−5} Торр и температура (<200 К), а также использовался аналог лунного полярного

реголита с различным содержанием воды. Было показано, что бурение обеспечивает многократный забор грунта по глубине с шагом 100 мм, при этом контролируется тепловой режим и реализуется возможность доставки образцов с сохранением летучих веществ. Многократный забор грунта по глубине считается оптимальным, так как позволяет детально изучить стратиграфию скважины, облегчает вынос бурового шлама и тем самым снижает энергетические затраты на глубинное бурение и обеспечивает необходимое сохранение охлажденного лунного грунта внутри скважины. В термовакуумной камере, в лунных условиях, были проведены эксперименты по оценке скорости сублимации летучих веществ (CO_2 , H_2O , OH , N_2 , Ar) в процессе бурения и выполнены соответствующие расчеты тепловых условий. Последние учитывали диффузию молекул в порах грунта (закон Фика) и их сублимацию с поверхности зерен вещества (закон Кнудсена). Было обнаружено, что при доставке образцов грунта с глубин более 0.5 м содержание в них H_2O сохраняется, хотя и уменьшается на 80% по сравнению с исходной концентрацией. Таким образом, эксперименты и расчеты показали, что такой тип ГГЗУ позволяет обеспечить криогенное бурение и доставку образцов реголита на поверхность (Teodoro и др., 2017).

В качестве основного варианта ГГЗУ для российской посадочной миссии Луна-27, создаваемой в рамках ОКР Луна–Ресурс-1 сейчас рассматривается научная аппаратура ProSEED, предложенная ESA и основанная на разработках ГГЗУ для марсохода ExoMars-2020 с учетом адаптации к лунным условиям и требованиями КА (Carpenter, Fisackerly, 2017). На сегодняшний день уже создан технологический прототип, который проходит испытания в специальной термовакуумной камере, где имитируются лунные условия (температура и давление) и различные типы лунных грунтов (с разным содержанием воды).

Как и в случае миссии ExoMars-2020 это ГГЗУ создается итальянской компанией Leonardo. ГГЗУ ProSEED должно обеспечить многократное взятие проб лунного грунта с разной глубины и их дальнейшую передачу для изучения нескольким аналитическим научным приборам, входящим в состав научной аппаратуры посадочного аппарата Луна-27.

ГГЗУ ProSEED входит в состав комплекса PROSRECT, состоящего из ГГЗУ ProSEED и аналитического научного прибора PROSPA (также создаваемого ЕКА), в который проба доставляется непосредственно из ГГЗУ. Доставка проб грунта в российские аналитические научные приборы осуществляется манипуляторным комплексом ЛМК, который забирает пробу грунта из ГГЗУ ProSEED. В этот список входит: аналитический

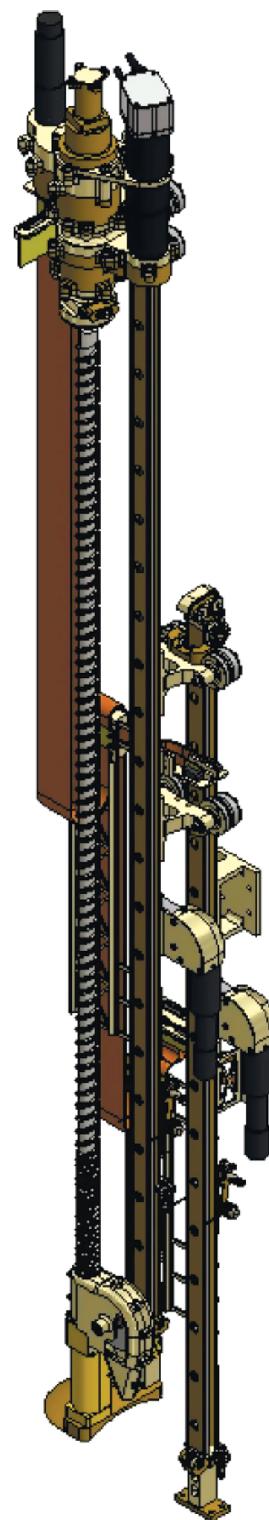


Рис. 7. Общий вид ГГЗУ Resource Prospector.

комплекс, состоящий из приборов ТА-Л (термоанализатор с пиролитическими ячейками), ГХ-Л (газовый хроматограф) и НГМС (газовый масс-спектрометр) и лазерный масс-спектрометр ЛАЗМА-ЛР.

В научные задачи миссии Луна-27 входит извлечение не менее 25 проб лунного реголита – из не менее 5-и разных скважин и не менее пяти образцов с разных глубин каждой скважины. Максимальная глубина, с которой должна извлекаться пробы, составляет около 1 м. В процессе взятия и передачи образцов должен обеспечиваться благоприятный температурный режим (минимальный нагрев образца) для максимальной сохранности летучих веществ. С учетом различных требований (объем пробы, сыпучесть, размер частиц), предъявляемых аналитическими приборами на КА Луна-27 к извлекаемому грунту, найдено техническое решение по комбинированному взятию образцов. Для прибора PROSPA доставка образца объемом около 1 см³ осуществляется непосредственно в полость на конце бурового инструмента, которая открывается по такому же принципу как в ГГЗУ на марсоходе ExoMars-2020. Доставка грунта осуществляется извлечением буровой штанги из скважины и поворотом ГГЗУ в определенное положение, чтобы совместить конец бурового инструмента и приемную воронку PROSPA. Она установлена на карусели с пиролитическими ячейками. Образец поршнем выдавливается из полости бурового инструмента внутрь воронки и далее в пиролитическую ячейку. Взятие оставшейся пробы грунта осуществляется с помощью выдвижной части бурового инструмента, имеющей внутри шнековую поверхность, на витках которой, в процессе взятия, остаются частицы грунта в достаточном для анализа количестве. При таком способе можно обеспечить большую рассыпчатость пробы и необходимый объем в 4–5 см³ для российских аналитических приборов, куда она доставляется с помощью манипулятора. В этом случае буровая штанга вынимается из скважины и ГГЗУ поворачивается в положение, в котором шнек с налипшим грунтом располагается над приемной воронкой. С помощью механических щеток грунт счищается в воронку и по ней попадает в приемное устройство манипулятора, подводимое под воронку, после чего манипулятор разносит грунт в приемные окна ТА-Л и ЛАЗМА-ЛР, дозируя его в соответствии с требованиями каждого прибора. Во обоих рассмотренных случаях основной задачей кинематики движения ГГЗУ является точное совмещение приемной воронки и бурового инструмента для успешной передачи грунта.

Полная масса ГГЗУ ProSEED составляет 31 кг, максимальная потребляемая мощность около 170 Вт (может регулироваться), прижимная сила не должна превышать 650 Н. ГГЗУ должна иметь собственную систему обеспечения терморегулирования, так как по тепловым интерфейсам она отвязана от конструкции КА.

В табл. 1 мы привели сравнение основных параметров лунных ГГЗУ, включая устройства для Луна-16, Луна-24 и ProSEED.

РАЗРАБОТКА ГГЗУ ДЛЯ БУДУЩИХ ЛУННЫХ МИССИЙ

В российской лунной программе заложена определенная последовательность полярных посадочных автоматических миссий, в каждой из которых предусмотрены взятие образцов полярного реголита с глубин, где могли сохраниться летучие вещества, с анализом их на борту, а в рамках некоторых миссий также и доставка образцов на Землю. Текущая Федеральная космическая программа (ФКП) действует до 2025 г. и включает реализацию посадочных миссий Луна-25, Луна-27 и начало работ по проекту Луна-28. За горизонтом 2025 г. также предусмотрены автоматические посадочные миссии, которые будут являться важными предшествующими элементами пилотируемой программы и будут использоваться для геологоразведки территории первых высадок и выбора оптимального места расположения будущей российской лунной базы. В качестве одного из важных составляющих программы рассматривается возможность использования автоматических станций для отработки взаимодействия людей и роботов. В первую очередь это касается привлечения космонавтов для управления аппаратурой на посадочных аппаратах с борта орбитальной станции.

Можно выделить несколько классов будущих лунных посадочных полярных миссий.

К первому классу относятся космические аппараты типа Луна-25 и Луна-27. Это стационарная посадочная платформа, которая обеспечивает мониторинг окружающей обстановки (поля заряженных и нейтральных частиц, пылевая, микрометеоритная и радиационная обстановка), проводит элементный, минералогический, изотопный анализ образцов близлежащего грунта, а также выполняет измерения его тепловых, механических и электромагнитных свойств на разной глубине.

Ко второму классу относятся космические аппараты типа Луна-28. Это также стационарная платформа, но ее основное предназначение – забрать стратиграфическую колонку или стратиграфический набор образцов грунта с глубины до 2 м максимально малоинвазивным способом, чтобы сохранить исходные свойства грунта (прежде всего состав летучих веществ) и доставить образцы на Землю. Кроме самой посадочной платформы в состав КА входит ГГЗУ и капсуляционно-транспортировочное устройство для герметичной упаковки образцов их загрузки в спускаемую капсулу возвратного аппарата, стартующего с поверхно-

Таблица 1. Сравнительный анализ лунных ГЗУ

	Луна-16, -20	Луна-24	Resource Prospector	ProSEED
Тип бурения	Колонковое	Колонковое	Цельный бур	Цельный бур
Режим внедрения	Ударно-вращательный	Ударно-вращательный	Ударно-вращательный	Вращательный
Способ очистки скважины	Шнек	Шнек	Шнек + многократный забор с разных глубин	Шнек + многократный забор с разных глубин
Забор с разных глубин	Однократное бурение с забором всей стратиграфической колонки	Однократное бурение с забором всей стратиграфической колонки	Дискретный забор каждые 10 см	Дискретный забор каждые 30–50 см
Способ забора	Колонковый	Гибкий грунтонос с забором всей стратиграфической колонки	На витках шнека в конце буровой штанги оптимизированных под забор пробы	Комбинированный: Внутри бурового инструмента На витках выдвижного шнека
Способ передачи пробы	Автоматическая упаковка всей колонки и возврат на Землю	Автоматическая упаковка всей колонки и возврат на Землю	Очистка шнека щеточным механизмом в приемное устройство	Комбинированный: Непосредственно в приемное окно НА Очистка шнека щеточным механизмом в приемное устройство манипулятора
Устройство раскрытия/выноса	Нет	Нет	Да	Да
Кол-во скважин	1	1	Многократно	Многократно
Усилие прижатия	80–120 Н	<400 Н	100 Н	<650 Н
Скорость бурения	56 мм/мин	150 мм/мин	1 м за час	Несколько см в минуту
Максимальный размер	690 мм	3200 мм	1800 мм	2500 мм
Глубина	417 мм	2400 мм	1000 мм	900–1000 мм
Диаметр бура	26 мм	28 мм	25.4 мм	25 мм
Объем пробы	101 г	170 г	12 см ³	Две пробы <1 и 4–5 см ³
Мощность	140 Вт	500 Вт	500 Вт	100–200 Вт
Вращательный механизм	508 об./мин	До 220 об./мин	120 об./мин	До 300 об./мин
Ударный механизм	1524 уд./мин	600 уд./мин	1160 уд./мин	Нет
Масса	13.6 кг	54 кг	20 кг	31 кг
Рабочий диапазон температур	Нет данных*	–150, +150°C	–60, +50°C	–50, +50°C

* Известно, что первое включение ГЗУ Луна-16 произошло при температуре –120°C.

сти с образцами внутри. Жизненный цикл посадочной платформы составляет не более одного лунного дня, и в программе исследований, как правило, не предусмотрена сложная процедура анализа образцов (возможен только их предварительный скрининг) и, в связи с этим, для этого класса миссий рассматривается упрощенный комплекс научной аппаратуры. Основные научные приборы планируется устанавливать на небольшом луноходе, который сможет отъехать в сторону и выжить после старта с Луны возвратного модуля. Для такого класса посадочных миссий важно предусмотреть орбитальный аппарат для командно-телеметрического обмена и получения научных данных с лунохода и также, для отработкистыковки на орбите с возвратным аппаратом, если будет выбрана такая схема миссии Луна-28.

К третьему классу относится миссия с луноходом среднего класса массой 200–400 кг оснащенный облегченной ГГЗУ (порядка 15 кг). В его задачи входит исследование большой территории на расстояния до нескольких десятков километров с проведением первичной геологразведки вдоль трассы движения. Такой проект подразумевает установку на луноход специализированного комплекса научной аппаратуры, позволяющего проводить дистанционный анализ подстилающей поверхности на глубину до 0,5–1 м и выбирать перспективные места остановки лунохода для проведения глубинного бурения, взятия образцов и их анализа на борту лунохода, например, с помощью хроматографического комплекса и масс-спектрометров. Часть образцов может сохраняться на борту лунохода, чтобы последующие миссии могли их забрать и вернуть на Землю.

К четвертому классу можно отнести миссии с тяжелыми аппаратами, которые сегодня еще находятся в самой начальной стадии концептуальной проработки, но скорее всего будут предназначены для подготовки и отработки высадки космонавтов и тяжелых луноходов на поверхность Луны, а в дальнейшем – для проведения срьезных геологоразведочных работ. К примерам таких проектов может относиться концепция лунохода – “Робот-геолог” (Vasiliev и др., 2017).

Исходя из накладываемых ограничений на каждый класс автоматических миссий, скорее всего, необходимо разработать несколько модификаций ГГЗУ, адаптированных под конкретные научные и технологические требования. Анализируя имеющиеся на сегодняшний момент разработки (см. главу “Обзор...” и табл. 1) и ограничения условий на лунной поверхности, можно выделить два способа взятия образцов грунта, которые могут быть реализованы в той или иной модификации ГГЗУ.

В первом способе отбор точечных проб производится на поверхности из стратиграфической

колонки реголита, изъятой при колонковом способе бурения, с использованием или без использования гибкого тракта (грунтоноса). Без грунтоноса стратиграфическая колонка забирается в полость трубы шнека бурового инструмента, имеющей технологические отверстия (см. рис. 8). Эти отверстия представляют собой либо продольные вырезы, распределенные по длине бурового инструмента, либо точечные отверстия для внедрения приемных устройств.

Наличие технологических отверстий незначительно влияет на жесткость бурового инструмента, но при этом дает возможность забора точечных проб с разной глубины. При этом улучшается проходимость бурового инструмента, так как коэффициент трения грунта по грунту намного выше, чем металла бурового инструмента по грунту, что позволяет протягивать колонку внутрь бурового инструмента при прохождении скважины. Этот эффект уменьшает возможность заклинивания колонки грунта внутри бурового инструмента. Тем не менее вероятность заклинивания колонки грунта внутри бурового инструмента все равно остается довольно высокой для радиусов бурового инструмента 20–30 мм при глубинах бурения более одного метра. Кроме этого, существенным недостатком такого извлечения колонки грунта является возможность осыпания столба реголита при извлечении на поверхность.

Чтобы свести вероятность заклинивания бурового инструмента к минимуму, используется гибкий грунтонос. Конструктивно данный способ отличается от простого колонкового наличием внутренней полой трубы, где в межстеночном пространстве уложен гибкий грунтонос из специального текстильного материала. Схема реализации изображена на рис. 9, где: 1 – резец, 2 – шнек, 3 – гибкий грунтонос, 4 – штанга буровая, 5 – наружная труба грунтоноса, 6 – подшипник, 7 – внутренняя труба грунтоноса, 8 – трос грунтоноса, 9 – соединение с приводом бурового инструмента, 10 – фланец крепления к корпусу привода бурового инструмента.

При прохождении скважины привод грунтоноса равномерно тянет его основание, что позволяет подхватывать и забирать внутрь колонку с грунтом. Это дает возможность проводить бурение на глубины более 2 м. Данный способ является оптимальным для миссий с возвращаемым аппаратом, так как заполненный, но все-таки достаточно гибкий грунтонос легко укладывается в контейнер возвратного модуля с сохранением стратиграфической колонки. Дополнительным преимуществом гибкого грунтоноса при криогенном бурении могут быть его теплоизоляционные свойства, позволяющие дальше сохранять изначальную температуру образца, минимизируя

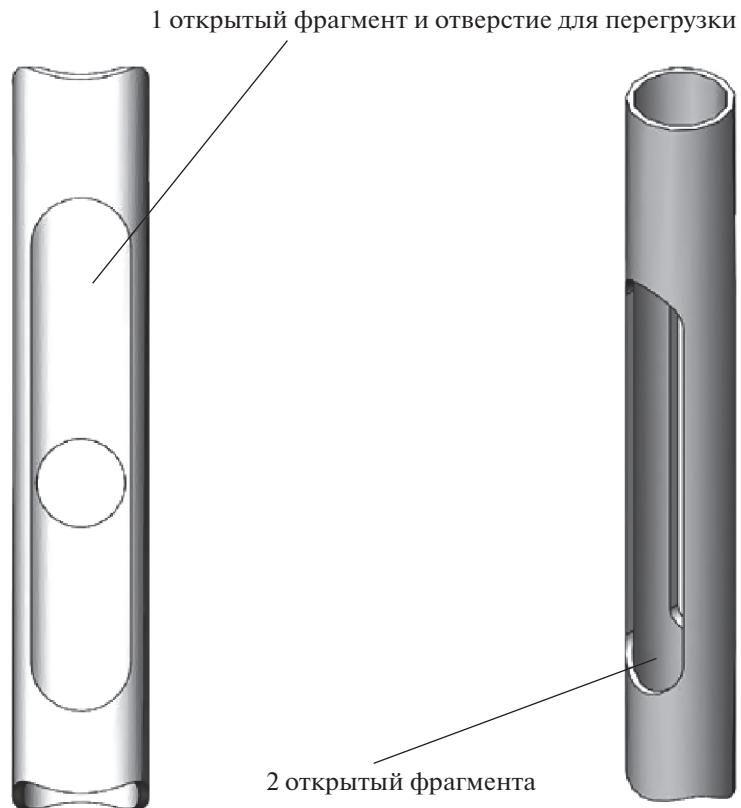


Рис. 8. Варианты исполнения колонковых буровых инструментов с открытыми фрагментами.

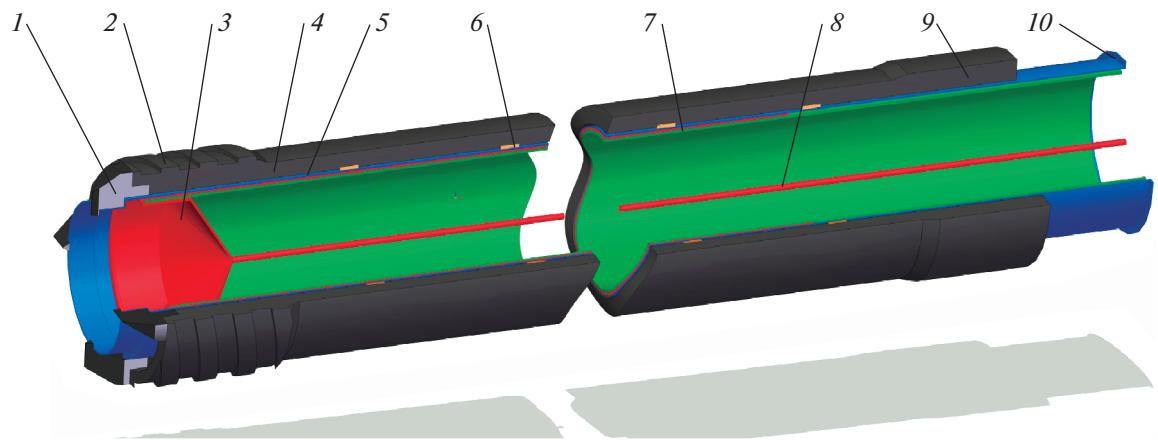


Рис. 9. Буровой инструмент, оснащенный гибким грунтоносом.

градиент температур между образцом и нагретыми стенками буровой штанги.

После внедрения бурового инструмента в процессе извлечения гибкого грунтоноса на поверхность допускается отбор, анализ и упаковка точечных проб грунта. Это возможно реализовать при помощи специального устройства точечного отбора и манипуляторного комплекса. Отбор проб осуществляется в процессе изъятия бурового

инструмента из скважины с остановкой для взятия одиночной пробы с заданной глубины. Схема работы такого комплекса изображена на рис. 10.

Для реализации этого способа на корпусе ГЗУ установлено устройство отбора пробы, которое протыкает гибкий грунтонос (он может состоять из нескольких самозатягивающихся шторок, которые пробоотборник раздвигает при входе), забирает и выдавливает порцию грунта в приемное

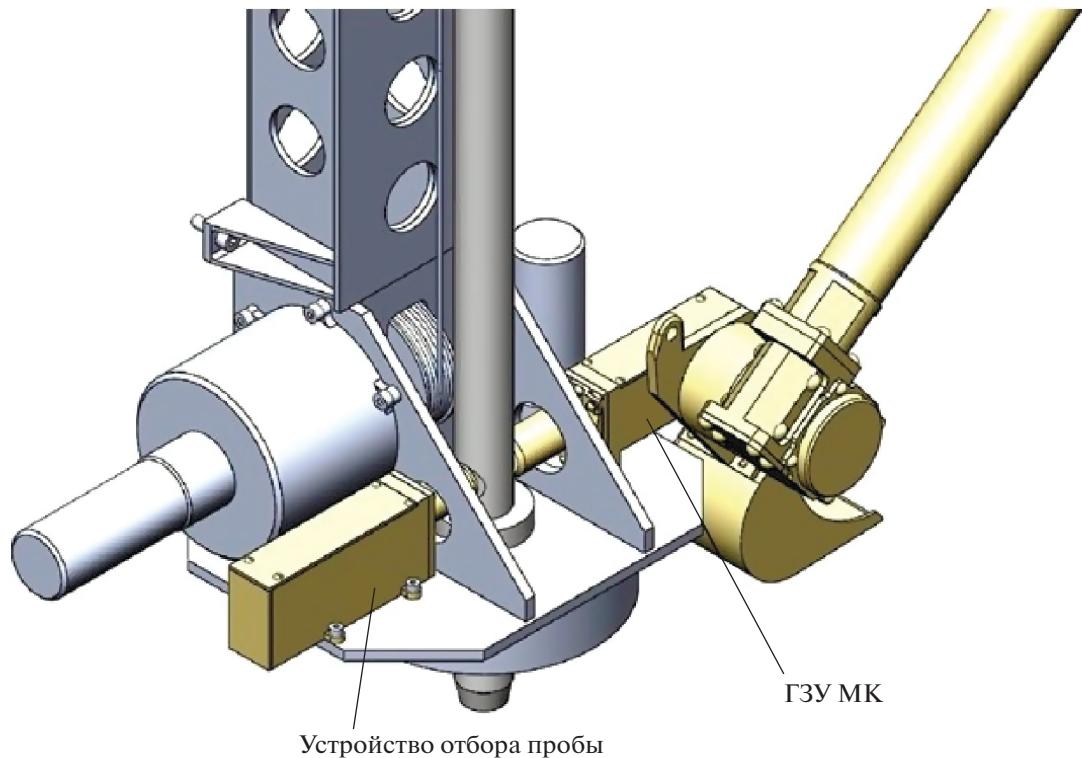


Рис. 10. Отбор точечных проб манипуляторным комплектом из ГГЗУ.

устройство манипуляторного комплекса, которое подводится с другой стороны бурового инструмента напротив приемного устройства.

Таким образом, колонковое бурение, реализованное в подобном устройстве, позволяет одновременно забирать стратиграфическую колонку вещества и проводить исследование точечных проб грунта, изъятых с разной глубины. В наибольшей степени это подходит для буровых устройств, предназначенных для посадочных миссий с последующим возвратом лунного вещества на Землю. В такой реализации можно обеспечить большую глубину бурения, сохранить стратиграфию вещества, отдельно отобрать и запаковать самостоятельные “точечные” пробы вещества с сохранением летучих веществ. Основные недостатки таких устройств – достаточно высокая сложность исполнения, требующая, для достижения высокой надежности, как и всей аппаратуры автоматических космических аппаратов, значительных наземных отработок, и невозможность установки на луноходы из-за высокой массы ГГЗУ и ограничений по бурению нескольких скважин.

Во втором способе отбор проб осуществляется шнековым транспортером. Для этой конфигурации ГГЗУ буровой инструмент выполнен в виде шнека, что обеспечивает проходку с невысоким

энергопотреблением на глубины более 1 м с малой вероятностью заклинивания. При таком способе бурения буровой шлам, выносится на поверхность или уплотняется в стенки скважины. Взятие грунта осуществляется устройством, расположенным в наконечнике бурового инструмента. Оно представляет собой малый шнековый транспортер, управляемый системой из двух приводов, позволяя независимо отбирать пробы грунта с любой глубины на “нетронутой” части скважины (дно скважины, где еще не происходило основное бурение), при этом с контролем прилагаемого усилия и температуры. Иллюстрация данного способа бурения на рис. 11, на котором слева направо показаны фазы полного цикла работы пробоотборника: 1 – проходка основной скважины (максимальные энергозатраты); 2 – внедрение шнекового пробоотборника (минимальные энергозатраты); 3 – втягивание шнека с отобранный пробой; 4 – перегрузка в приемное устройство путем освобождения шнековой полости. При вращении шнекового пробоотборника через специальную шайбу (показана зеленым цветом) грунт счищается со шнека и высыпается обратно в полость; 5 – очистка полости пробоотборника от оставшихся фрагментов грунта.

В ходе бурения основные энергозатраты идут на проходку скважины до нужной глубины, после



Рис. 11. Схема работы бурового инструмента с шнековым пробоотборником (слева—направо).

чего используется выдвижной шнековый транспортер для внедрения в дно скважины. Образец грунта захватывается на его винтовой поверхности и втягивается вместе со шнеком. Чтобы доставить образец на поверхность необходимо извлечь буровой инструмент из скважины и перед выгрузкой совместить его законцовку с приемным устройством аналитического прибора или передающим устройством, таким как приемник манипуляторного комплекса. Таким образом, представленный способ также позволяет отбирать пробы с разной глубины, но для этого требуется выемка всего бурового инструмента из уже пробуренной скважины, что увеличивает время доставки образца до аналитических приборов, снижает вероятность сохранения летучих и также возрастает вероятность обрушения стенок сква-

жин при извлечении инструмента и может привести к невозможности продолжить бурение в этой скважине. Однако экспериментальные отработки и численное моделирование ГГЗУ Lunar Resource Prospector (см. выше) показывают, что такой способ бурения работает и обеспечивает криогенный забор грунта. Еще одним отрицательным аспектом является использование приводов в наконечнике инструмента, что повышает вероятность отказа в условиях больших отрицательных температур. В тоже время основными преимуществами являются: существенно меньшая сложность устройства, чем в аппаратуре для колонкового бурения, малая масса ГГЗУ, возможность реализовать многократное бурение в нескольких скважинах, размельченная проба реголита, снятая с винтовой поверхности шнека.

Поэтому такая модификация ГГЗУ рассматривается, как наиболее предпочтительная для установки на небольшие посадочные платформы типа Луна-27 и на средние луноходы, с той целью, чтобы в ходе таких миссий был обеспечен криогенный забор грунта с глубины не менее 1 м.

Кроме выбора способа забора грунта немаловажно определиться с компоновкой всего ГГЗУ, как достаточно большого и сложного узла, непосредственно встраиваемого в конструкцию посадочного аппарата или лунохода. С учетом того, что глубина проходки скважины составляет 1–2 м, возникают соответствующие требования к габаритам бурового инструмента, а следовательно, и к габаритам базовой конструкции ГГЗУ в условиях использования на современном КА. Масса ГГЗУ ограничена, и не может превышать 30–35 кг для посадочных платформ, и 10 кг для небольших луноходов. Агрессивная лунная пылевая среда и свойства самого реголита (сильная адгезия, абразивность и мелкий размер частиц) не позволяют использовать составной буровой инструмент, что могло бы в разы снизить габариты и динамическую нагрузку на КА. Сложность размещения устройств больших габаритов накладывает ограничения на жесткость конструкции и требует учитывания температурных расширений устройства при его работе в широком диапазоне температур, имеющихся на Луне, и задает высокие требования к используемым материалам. Работа в широких температурных диапазонах, а также переживание лунной ночи требуют термоизоляции и использования источников тепла, таких как РИТы, либо электрического подогрева. Большое количество движущихся узлов, многие из которых совершают большие перемещения, накладывает ограничения на их исполнение с целью их компактности, минимального энергопотребления и точности. При этом используются современные компактные электродвигатели космического исполнения вместе с минимальным количеством редукторов и паразитных передач. Линейные перемещения реализуются несколькими способами, наиболее предпочтительные из которых передача винт-гайка (точен и удобен для узлов малых габаритов, например актуаторы с длинной штока до 100 мм) и передача системой тросов. Ее преимущество состоит в малом весе и реализации длинных перемещений без серьезного прироста в массе в отличие от передачи винт-гайка. Конструкция ГГЗУ при всех этих ограничениях должна обеспечивать взаимодействие с устройствами передачи грунта в аналитические приборы и капсулирующими устройствами (для миссий с возвратом грунта на Землю).

Основываясь на проведенном выше анализе конструкций различных ГГЗУ, можно предло-

жить некоторые общие компоновочные решения для лунных буровых устройств. Так подачу бурового инструмента по оси желательно реализовать на системе тросов, исходя из большой глубины погружения. Так же система тросов благодаря своей упругости сыграет роль пружинного аккумулятора усилий при возникновении проблем с проходкой без резких перегрузок двигателей и редукторов. Приводы исполнительных механизмов разнесены группами на подвижных и статичных частях ГГЗУ, исходя из сложности обеспечения теплового режима, а также технологических ограничений по прокладке кабелей к динамическим узлам. Каждое компоновочное решение должно предусматривать реализацию обоих предпочтительных способов изъятия проб, описанных в главе выше.

Можно выделить два типа компоновочных решений ГГЗУ:

1) Сварная пространственная конструкция. Состоит из трубчатых полых направляющих, соединенных пластиначатыми перемычками/шпангоутами. Предпочтительный материал такой конструкции – сплав титана. Она имеет малый вес и хорошо адаптируется к моментам силы на изгиб, приложенным к основной оси ГГЗУ. При этом обеспечивается центровка бурового инструмента относительно фермы. К сожалению, для данного типа фермы затруднена возможность горизонтальной передачи пробы из-за пространственной конструкции, которая усложняет подход манипуляторного комплекса к буровому инструменту. Пример сварной пространственной конструкции с буровым инструментом длиной 2 м представлен на рис. 12.

2) ГЗУ с фермой, основанной на замкнутом профиле. Эта компоновочное решение имеет ряд особенностей, включая: упрощенное изготовление (за счет возможности использовать готовый стандартный профиль); большую жесткость конструкции (гораздо выше, чем у сварной конструкции); небольшой вес; точный ход подвижных частей ГГЗУ (за счет избавления от большинства консольных нагрузок и точности изготовления самой фермы). Пример такой конструкции представлен на рис. 13, а на рис. 14 показан пример ее статичного (без механизма выноса и перемещения) размещения и взаимодействие с манипуляторным комплексом на борту посадочной платформы.

ВЫВОДЫ

Суммируя уже накопленный опыт разработок ГГЗУ для лунных исследований и адаптируя его для будущих лунных посадочных полярных миссий разных классов, можно заключить следующее.



Рис. 12. Сварная пространственная конструкция ГГЗУ.

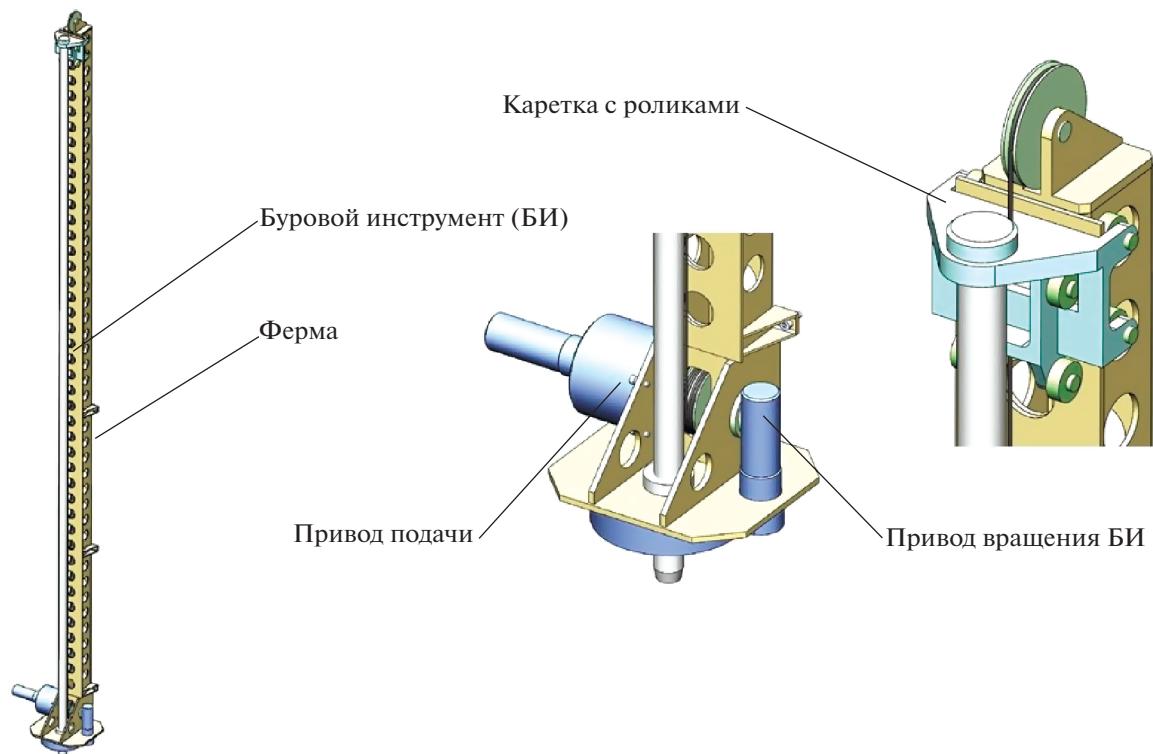


Рис. 13. Конструкция ГГЗУ, основанная на замкнутом профиле.

1) Для класса средних посадочных платформ, например на КА Луна-27, требуется ГГЗУ с полной массой не более 25 кг, потреблением не более

200 Вт (которое может регулироваться в зависимости от выбранного режима работы), прижимным усилием не более 300 Н, выполненное в виде

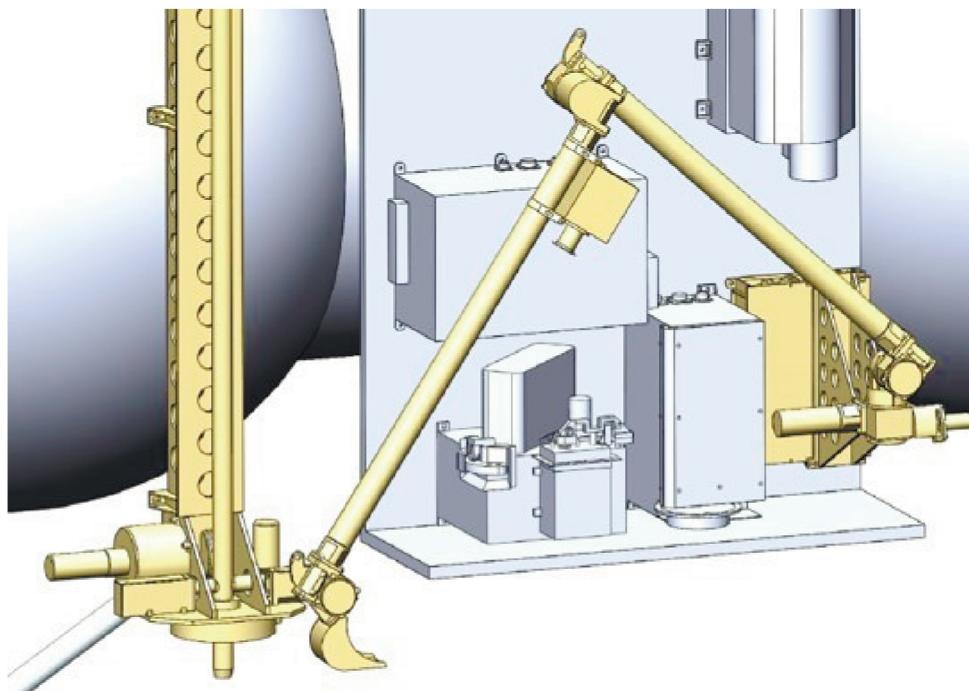


Рис. 14. Размещение и взаимодействие ГГЗУ с манипуляторным комплексом на КА.

единой облегченной фермы, снабженной устройством выноса и поворота. ГГЗУ должно использовать ударно-вращательный принцип бурения на глубину в диапазоне 1–2 м, и оснащаться внешним шнеком для проходки скважины и внутренним шнеком для забора грунта. ГГЗУ должно допускать взаимодействие с приемными устройствами манипуляторного комплекса для выгрузки образцов грунта. Внутренний шнек должен иметь механизм очистки, позволяющий счищать налипший грунт в окно приемного устройства. Законцовка бурового инструмента должна быть снабжена датчиками для анализа механических свойств грунта и контроля за температурой забираемого образца. Объем забираемого образца будет определяться характеристиками аналитических приборов, и может составлять от нескольких кубических сантиметров до 10 см³. Поскольку в закреплении ГГЗУ участвуют элементы конструкции посадочного аппарата, температура которых, как правило, не поддерживается в диапазоне, достаточном для работы и выживания в режиме ожидания, то ГГЗУ должно иметь собственную систему терморегулирования и быть термоизолировано от конструкции КА.

2) Для класса средних луноходов по сравнению с посадочной платформой конструкция ГГЗУ упрощается в части отказа от механизма перемещения и возможно механизма выноса. Требования по многократному бурению здесь обеспечиваются за счет бурения на разных остановках лунохода. Из-

за уменьшения массы глубина бурения также уменьшается до 1–1.5 м, что по-прежнему позволяет достичь глубин, где могли сохраниться летучие вещества. Полная масса ГГЗУ для мобильных платформ не должна превышать 15 кг. Кроме аналитических приборов, комплекс научных приборов должен в обязательном порядке включать аппаратуру для дистанционного зондирования подповерхностного слоя (радар или гамма-спектрометр), чтобы выбирать наиболее перспективные места для остановок лунохода и проведения сеанса бурения.

3) Наконец, для более тяжелого класса посадочных платформ, в первую очередь предназначенных не только для забора грунта и его анализа на борту, сколько для его возврата на Землю, наиболее подходящим решением является ГГЗУ колонкового типа, снабженное внутренним гибким грунтоносом, и в обязательном порядке допускающее взятие не только стратиграфической колонки, но и отдельных проб с разной глубины в процессе передачи колонки грунта из скважины на борт КА. ГГЗУ в этом случае может иметь массу до 35 кг и обеспечивать бурение на глубины более 2 м. Отбор “точечных” проб подразумевает не только их передачу в аналитические приборы на выборочный скрининг, но и герметичную упаковку или капсулирование для отправки на Землю.

Так как разрабатываемые ГГЗУ предназначены для полярного бурения, то их основной целью является взятие и доставка на поверхность образ-

цов грунта с сохранением различных летучих веществ, прежде всего водяного льда. Для этого, в дополнение к приведенным выше типам конструкции ГГЗУ, должно быть разработано специальное ПО, позволяющие гибко варьировать режимы работы, чередуя энергозатратные фазы бурения до заданной глубины с режимами с малым потреблением энергии, предназначенными для взятия образцов с непотревоженного дна скважины с минимальным их нагревом и быстрой передачей их в приемные устройства аналитических приборов или манипулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барсуков В.Л.** Лунный грунт из Моря Кризисов: Сб. статей. М.: Наука, 1980. 360 с.
- Долгополов В.П., Ефанов В.В., Зайцева О.Н., Зеленый Л.М., Мартынов М.Б., Пичхадзе К.М.** Перспективные космические аппараты для фундаментальных и прикладных исследований Луны // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 3(64). С. 52–65.
- 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. (Dyachkova M.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B. Selection of Luna-25 landing sites in the South Polar Region of the Moon // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. P. 185–195.)
- 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>
- Anand M., Crawford I.A., Balat-Pichelin M., Abanades S., van Westrenen W., Péraudeau G., Jaumann R., Seboldt.** A brief review of chemical and mineralogical resources on the Moon and likely initial In Situ Resource Utilization (ISRU) applications // Planet. Space Sci. 2012. V. 74. P. 42–48.
- Anderson R.C., Jandura L., Okon A.B., Sunshine D., Roumeliotis C., Beagle L.W., Hurowitz J., Kennedy B., Limonadi D., McCloskey S., Robinson M., Seybold C., Brown K.** Collecting samples in Gale Crater, Mars; an overview of the Mars Science Laboratory Sample Acquisition, Sample Processing and Handling system // Space Sci. Rev. 2012. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9898-9>
- Canup R.M., Asphaug E.** Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation // Nature. 2001. V. 412. P. 708.
- Carpenter J., Fisackerly R.** PROSPECT: ESA's Package for Resource Observation and In-Situ Prospecting for Exploration, Commercial Exploitation, and Transportation // 48th Lunar and Planet. Sci. Conf. held 20–24 March 2017, at the Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id. 2514.
- Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., Wooden D., Shirley M., Ennico K., Hermalyn B., Marshall W., Ricco A., Elphic R.C., Goldstein D., Summy D., Bart G.D., Asphaug E., Korycansky D., Landis D., Sollitt L.** Detection of water in the LCROSS ejecta plume // Science. 2010. V. 330. P. 463.
- Crawford I.** Lunar resources: A review // Progress in Phys. Geography. 2015. V. 39. P. 137–167. <https://doi.org/10.1177/030913314567585>
- Cridler D., Vondrak R.R.** The solar wind as a possible source of lunar polar hydrogen deposits // Geophys. Res. Planets. 2000. V. 105. P. 26773.
- Fegley B., Swindle T.D.** Resources of Near-earth Space / Eds Lewis J.S., Matthews M.S., Guerrieri M.L. Tucson: Univ. of Ariz. Press, 1993. P. 367.
- Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B., Barraclough B.L., Elphic R.C., Lawrence D.J.** Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: Evidence for water ice at the lunar poles // Science. 1998. V. 281. P. 1496–1500.
- Grotzinger J.P., Crisp J., Vasavada A.R., Anderson R.C., Baker C.J., Barry R., Blake D.F., Conrad P., Edgett K.S., Ferdowski B., Gellert R., Gilbert J.B., Golombek M., Gomez-Elvira J., Hassler D.M., Jandura L., Litvak, M., Mahaffy P., Maki J., Meyer M., Malin M.C., Mitrofanov I., Simmonds J.J., Vaniman D., Welch R.V., Wiens R.C.** Mars Science Laboratory Mission and Science Investigation // Space Sci. Rev. 2012. V. 170. P. 5–56.
- Hauri E.H., Saal A.E., Rutherford M.J., Van Orman J.A.** Water in the Moon's interior: Truth and consequences // Earth and Planet Sci. Lett. 2015. V. 409. P. 252–264.
- Hayne P.O., Hendrix A., Sefton-Nash E., Siegler M.A., Lucey P.G., Rutherford K.D., Williams J.-P., Greenhagen B.T., Paige D.A.** Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements // Icarus. 2015. V. 255. P. 58.
- Milliken R.T., Li S.** Remote detection of widespread indigenous water in lunar pyroclastic deposits // Nat. Geosci. 2017. V. 10. P. 561–565.
- 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., Milikh G., Mokrousov M., Starr R., Sagdeev R., Shevchenko V., Shvetsov V., Tret'yakov 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.
- Needham D.H., Kring D.A.** 48th Lunar and Planet. Sci. Conf. 20–24 March 2017, The Woodlands, Texas (LPI Contribution, No. 1964) 2017. P. 1192.
- Neumann G.A., Cavanaugh J.F., Sun X., Mazarico E.M., Smith D.E., Zuber M.T., Mao D., Paige D.A., Solomon S.C., Ernst C.M., Barnouin O.S.** Bright and dark polar deposits on Mercury: Evidence for surface volatiles // Science. 2013. V. 339. P. 300.
- Paige D.A., Siegler M.A., Harmon J.K., Neumann G.A., Mazarico E.M., Smith D.E., Zuber M.T., Harju E., Delitsky M.L., Solomon S.C.** Thermal stability of volatiles in the north polar region of Mercury // Science. 2013. V. 339. P. 296.
- Patterson G.W., Stickle A.M., Turner F.S., Jensen J.R., Bussey D.B.J., Spudis P., Espiritu R.C., Schulze R.C., Yocky D.A., Wahl D.E., Zimmerman M., Cahill J.T.S., Nolan M., Carter L., Neish C.D., Raney R.K., Thompson B.J., Kirk R., Thompson T.W., Tise B.L., Erteza I.A., Jakowatz C.V.** Bistatic radar observations of the Moon us-

- ing Mini-RF on LRO and the Arecibo Observatory // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 2–19.
- Paulsen G., Zacny K., Kim D., Mank Z., Wang F., Thomas N., Hyman C., Mellerowicz B., Yaggi B., Fitzgerald Z., Ridilla A., Atkinson J., Quinn J., Smith J., Kleinhenz J.* TRL6 lunar Resource Prospector drill // *Lunar and Planet. Sci. Conf. XLVIII*. 2017. Abstract # 1362.
- Saal A.E., Hauri E.H., Cascio M.L., Van Orman J.A., Rutherford M.C., Cooper R.F.* Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior // *Nature*. 2008. V. 454. P. 192.
- Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Bakhtin B.N., Bodnarik J.G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., Harshman K., Fedosov F., Golovin D.V., Kozyrev A.S., Livengood T.A., Malakhov A.V., McClanahan T.P., Mokrousov M.I., Starr R.D., Sagdeev R.Z., Tret'yakov V.I., Vostrukhin A.A.* Hydrogen distribution in the lunar polar regions // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 20–30.
- Siegler M.A., Miller R.S., Keane J.T., Laneuville M., Paige D.A., Matsuyama I., Lawrence D.J., Crotts A., Poston M.J.* Lunar true polar wander inferred from polar hydrogen // *Nature*. 2016. V. 531. P. 480.
- Simpson R.A., Tyler G.L., Leonard G.* Reanalysis of Clementine bistatic radar data from the lunar South Pole // *J. Geophys. Res. Planets*. 1999. V. 104. P. 3845.
- Smith P.H., Tamppari L., Arvidson R.E., Bass, D., Blaney D., Boynton W., Carswell A., Catling D., Clark B., Duck T., DeJong E., Fisher D., Goetz W., Gunnlaugsson P., Hecht M., Hipkin V., Hoffman J., Hviid S., Keller H., Kounaves S., Lange C.F., Lemmon M., Madsen M., Malin M., Markiewicz W., Marshall J., McKay C., Mellon M., Michelangeli D., Ming D., Morris R., Renno N., Pike W.T., Staufer U., Stoker C., Taylor P., Whiteway J., Young S., Zent A.* Introduction to special section on the Phoenix Mission: Landing site characterization experiments, Mission Overviews, and Expected Science // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. CiteID E00A18.
- Spohn T., Grott M., Smrekar S.E., Knollenberg J., Hudson T.L., Krause C., Müller N., Jänenchen J., Börner A., Wippermann T., Krömer O., Lichtenheldt R., Wiśniewski L., Grzygorczuk J., Fittock M., Rheershemius S., Spröwitz T., Kopp E., Walter I., Plesa A.C., Breuer D., Morgan P., Banerdt W.B.* The heat flow and physical properties package (HP³) for the InSight mission // *Space Sci. Rev.* 2019. V. 214. id. 96.
- Teodoro L.F.A., Colaprete A., Roush T., Elphic R., Cook A., Kleinhenz J., Fritzler E., Smith J.T., Zacny K.* Numerical models of volatiles loss during Lunar Resource Prospector mission sample acquisition // *Lunar Exploration Analysis Group*. 2017. Abstract # 5058.
- Vago J.L., Westall F., Pasteur Instrument Team, Pasteur Landing Team, Coates A.J., Jaumann R., Korablev O., Ciarletti V., Mitrofanov I., Josset Jean-Luc, De Sanctis, Maria Cristina, Bibring Jean-Pierre, Rull F., Goesmann F., Steininger H., Goetz W., Brinckerhoff W., Szopa C., Raulin F., Howell G.M., Whyte L.G., Fairén A.G., Bridges J., Hauber E., Ori G.G., Werner S., Loizeau D., Kuzmin R.O., Williams R.M.E., Flahaut J., Forget F., Rodionov D., Svedhem H., Sefton-Nash E., Kmínek G., Lorenzoni L., Joudrier L., Mikhailov V., Zashchirinskiy A., Alexashkin S., Calantropio F., Merlo A., Poulakis P., Wittasse O., Bayle O., Bayón S., Meierhenrich U., Carter J., García-Rui J.M., Baglioni P., Haldemann A., Ball A.J., Debus A., Lindner R., Haessig F., Monteiro D., Trautner R., Voland C., Rebeyre P., Goultby D., Didot F., Durrant S., Zekri E., Koschny D., Toni A., Visentin G., Zwick M., van Winnendael M., Azkarate M., Carreau C., ExoMars Project Team.* Habitability on Early Mars and the Search for Biosignatures with the ExoMars Rover // *Astrobiology*. 2017. V. 17. <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1533>
- Vasavada A.R., Paige D.A., Wood S.E.* Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits // *Icarus*. 1999. V. 141. P. 179.
- Vasiliev A., Dalyaev I., Slyuta E.* Design concept of lunar rover for the Moon geological exploration // 28th Daaam Int. Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, Vienna, Austria. 2017. P. 0780–0786. <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.110>
- Watson K., Murray B., Brown H.J.* On the possible presence of ice on the Moon // *Geophys. Res.* 1961. V. 66. P. 1598.
- Zacny K., Paulsen G., McKay C.P., Glass B., Dave A., Davila A.F., Marinova M., Mellerowicz B., Heldmann J., Stoker C., Cabrol N., Hedlund M., Craft J.* Reaching 1m deep on Mars: The IceBreaker Drill // *Astrobiology*. 2013. V. 13. <https://doi.org/10.1089/ast.2013.1038>
- Zacny K., Paulsen G., Chu P., Mellerowicz B., Yaggi B., Klein-henz J., Smith J.* The IceBreaker drill system: Sample acquisition and delivery for the lunar resource prospecting mission // 46th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2015. Abstract # 1614.
- Zacny K., Paulsen G.* 1 m class drill for acquisition and transfer of volatile rich samples on the Moon, Mars, and ocean worlds // 3rd Int. Workshop on Instrumentation for Planet. Missions. 2016a. Abstract # 4118.
- Zacny K., Paulsen G., Wang A., Yaggi B., Quinn J., Smith J.* Lunar Resource Prospector drill // 47th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2016b. Abstract # 1614.
- Zhang J.A., Paige D.A.* Cold-trapped organic compounds at the poles of the Moon and Mercury: Implications for origins // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L16203.