

## ОБЗОРЫ

## OVERVIEWS

УДК 629.784:523.3 + 629.7.058.43

DOI 10.34131/MSF.21.4.101-116

### ИССЛЕДОВАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАВОВЫХ ТУННЕЛЕЙ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛУННЫХ МИССИЯХ (*Часть 1*)

Б.И. Крючков, И.Н. Куликов, Б.В. Бурдин

Докт. техн. наук Б.И. Крючков; канд. воен. наук, доцент И.Н. Куликов;  
канд. техн. наук, с.н.с. Б.В. Бурдин (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В настоящей статье представлены подходы к исследованию и использованию человеком таких уникальных природных образований, которыми являются лунные лавовые туннели. Важнейшей прикладной технологией, предлагаемой к применению на этапах проектирования, строительства и эксплуатации лунных баз является лазерное сканирование. Возможности современных лидарных систем позволяют получать пространственные данные об объектах и образованиях на поверхности других планет с высокой точностью и оперативностью. Рассмотрены вопросы практического применения подвижных и стационарных сканирующих лазерных систем при исследовании лунных лавовых туннелей.

**Ключевые слова:** лунные лавовые туннели; лидар; лазерные сканирующие системы; дистанционный мониторинг объектов на Луне.

#### **Survey and Use of Lava Tunnels during Future Lunar Missions (Part 1). B.I. Kryuchkov, I.N. Kulikov, B.V. Burdin**

The paper presents approaches to the survey and use of such unique natural formations as lunar lava tunnels. The most important applied technology proposed for use at the stages of design, construction and operation of lunar bases is laser scanning. The capabilities of existing lidar systems allow obtaining spatial data on objects and formations on the surface of other planets with high accuracy and efficiency. The issues of practical application of mobile and stationary scanning laser studies of lunar lava tunnels are considered.

**Keywords:** lunar lava tunnels; lidar; laser scanning systems; remote monitoring of objects on the Moon.

Актуальными событиями, характеризующими современный этап развития крупных космических держав, являются непосредственная подготовка к проведению полетов по освоению Луны, Марса и других космических тел, в том числе, малых планет Солнечной системы, а также изучение их поверхности автоматическими аппаратами, включая планетоходы, с целью организации активной напланетной деятельности человека.

Подтверждением этому являются успешное функционирование марсоходов Curiosity и Perseverance (Национальное управления по авиации и исследованию космического пространства – NASA), Zhurong / Tianwen-1 (Китайская аэрокосмическая научно-техническая корпорация), лунные проекты Китая – Chang'e, США – VIPER (Volatiles Investigating Polar Exploration Rover) в составе программы Artemis, Индии – Chandrayaan, а также отечественные – «Луна – 25; 26; 27; 28; 29 и 30» в составе лунной программы Российской Федерации [1].

### Основные способы исследований и организации деятельности на Луне

Как показывает общий анализ обозначенных выше национальных исследовательских программ Луны, основными этапами освоения других планет являются (рис. 1) [1]:

- 1) проведение напланетных исследований с помощью низкоорбитальных космических станций и автоматических планетоходов (универсальных и специализированных);
- 2) выполнение беспилотных миссий транспортных космических кораблей на орбиту осваиваемой планеты;
- 3) проведение пилотируемых миссий для создания долговременных орбитальных космических станций;
- 4) посадка космонавтов на поверхность планеты с использованием лунного взлетно-посадочного комплекса (ЛВПК) и проведение подготовительной деятельности по ее освоению;
- 5) строительство и эксплуатация стационарных лунных баз в интересах проведения регулярных научных исследований и освоения ресурсов планеты.

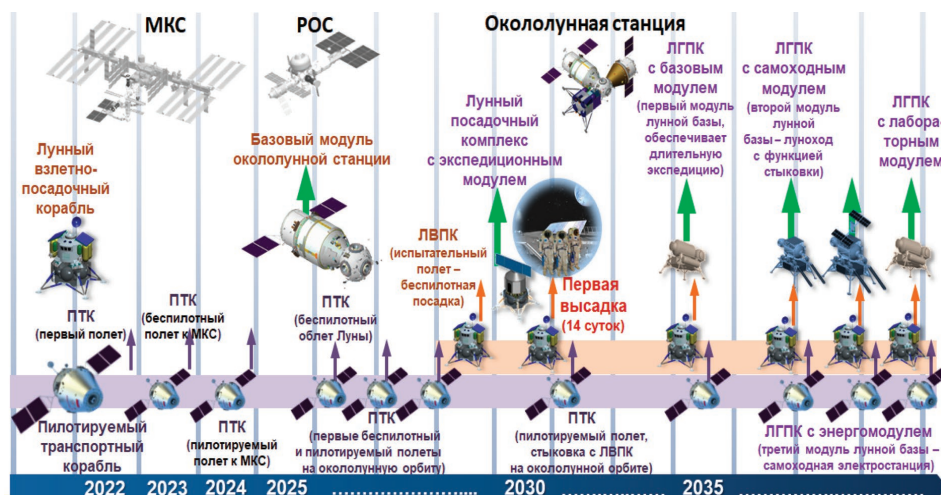


Рис. 1. Вариант дорожной карты обеспечения реализации лунной программы РФ

Наименее исследованными и более сложными объективно являются этапы деятельности, связанной с участием в ней человека и непосредственным проведением работ на поверхности других планет.

Прежде всего, эти периоды характеризуются специфическими условиями пребывания на планете (радиационная опасность, аномальные температуры, гравитация и пр.) и ограниченными возможностями человеческого организма. Другим важным фактором является необходимость организации именно долговременной деятельности человека, что определяется созданием и оборудованием мест труда и отдыха космонавтов. А это, в свою очередь, требует проведения большого комплекса работ, связанных с инженерными изысканиями, проектированием и строительством первых лунных (марсианских) баз, а также отработкой технологии их развития и эффективной эксплуатации.

Существует огромное количество проектов освоения Луны и других планет Солнечной системы, которые подтверждены серьезными расчетами и обоснованиями [2, 3, 4].

В подавляющем числе случаев многообразие решений по освоению Луны сводится к необходимости организации (строительства) космических лунных баз, позволяющих обеспечивать долговременные экспедиции посредством создания комфортных и безопасных (квазиземных) условий жизни и профессиональной деятельности космонавтов.

В настоящее время разработаны следующие основные методы организации лунных баз:

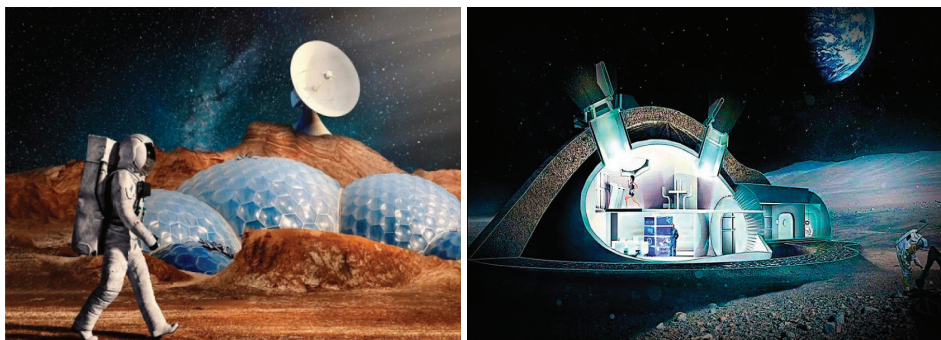
I. Применение в качестве узловых элементов базы посадочных (орбитальных) космических модулей (рис. 2) [5, 6].

II. Строительство (монтаж) напланетной базы на основе доставляемых на поверхность Луны специальных легкосборных конструкций, предварительно разработанных и изготовленных на ее орбите или на Земле (рис. 3, а) [7, 8].

III. Сооружение лунной базы с использованием строительных материалов добываемых (производимых) непосредственно на поверхности планеты (рис. 3, б) [9, 10].



Рис. 2. Организация лунной деятельности на базе посадочного модуля



а) сооружения из легкосборных конструкций на основе углеволокна

б) устройство конструкций базы из искусственных реголитовых блоков

Рис. 3. Методы строительства лунных баз

IV. Использование в части главных или вспомогательных конструктивных элементов базы естественных укрытий, образованных на поверхности исследуемой планеты в ходе вулканических, тектонических, атмосферно-гидрологических и иных видов воздействий, включая метеоритные (пещер, лавовых труб, разломов, каньонов, колодцев, каверн, ударных воронок и др.) [11].

Оценивая практическую реализуемость представленных выше методов организации напланетных баз, необходимо указать следующее:

а) развертывание системы базирования на основе посадочных космических модулей является наиболее простым и малозатратным, однако обладает низкими показателями эффективности в связи с объективно ограниченным потенциалом космических станций по объемам рабочей площади, запасу ресурсов, энергетическим возможностям и общей функциональности; показатели оперативности и мобильности при реализации метода I наиболее высокие (станция может начинать работу сразу после посадки, существует возможность изменения ее исходного местоположения);

б) реализация методов II и III потребует доставки на поверхность других планет большого количества специальных материалов, строительных машин и механизмов, а также участия значительного количества профильных специалистов. Это, в свою очередь, вызовет необходимость использования многоразовых полетов большегрузных транспортных космических кораблей, что является очень затратным и повлечет серьезное усложнение организации работ, а также необходимость применения, помимо человека, роботизированной техники различного типа; показатели оперативности и мобильности при реализации данных методов строительства стационарной базы наиболее низкие (время начала работы базы обусловлено доставкой и использованием большого объема материалов и разнообразных ресурсов), мобильность для метода II – минимальная, а для метода III – отсутствует;

в) использование в качестве основных элементов базы естественных укрытий на поверхности Луны оценочно является наименее затратным и высокооперативным, однако потребует осуществления определенного комплекса предварительных изыскательских работ, проводимых, в том числе, с помощью автоматических роботизированных поисково-инженерных систем и (или) непосредственно космонавтами.

### **Что такое «лавовые туннели», их характеристики и применимость для размещения обитаемых модулей лунных баз**

Последние два десятилетия применения космических исследовательских аппаратов на орбитах планет Солнечной системы ознаменованы открытием под их поверхностью большого числа уникальных геологических образований, каковыми являются лавовые туннели и пещеры. В настоящее время подповерхностные пустоты идентифицированы на Луне и Марсе, а также подтверждены на Венере, Фобосе, Эросе, Гаспре, Иде, Энцеладе и Европе.

В общем случае, на сегодняшний день открыто, описано и удаленно исследуются более сотни различных геологических пустот, имеющих выход на поверхности различных планет Солнечной системы и обладающих потенциальной возможностью непосредственного проведения в них предварительных геодезических, геологических, экологических и других видов специальных инженерных изысканий [12].

Наиболее актуальная информация о Луне доставляется с помощью космического аппарата Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) – автоматической межпланетной станции, ведущей непрерывный мониторинг поверхности данной планеты с 2009 года. Изучением «провала» (рис. 4) сейчас занимаются эксперты Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США. Как отметили там, его диаметр составляет около 100 м.

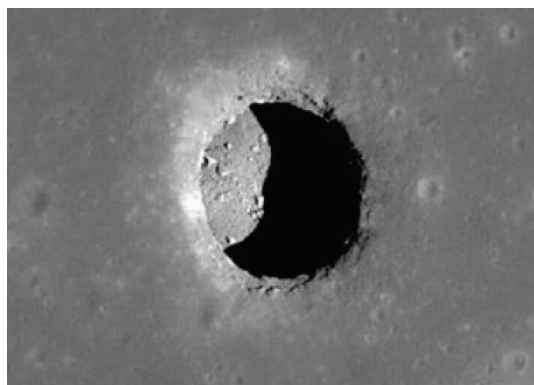


Рис. 4. Фото характерного геологического провала на поверхности Луны (автоматическая межпланетная станция NASA Lunar Reconnaissance Orbiter)

С большой вероятностью предполагается, что это может быть входом в протяженную систему туннелей, существующих под поверхностью Луны, и речь идет о так называемых «лавовых трубках», которые в большом количестве изучаются и исследуются и на Земле [13] (рис. 5).

Представляет большой интерес внутреннее устройство лунных лавовых туннелей. Поскольку лавовые трубки – это каналы, которые получают при неравномерном остывании текущей со склонов вулкана лавы, то поверхностные слои лавы из-за контакта с внешней средой, которая гораздо холоднее самой лавы, остывают быстрее и становятся монолитными, образуя твердую корку.

Она создает тепловую изоляцию для внутренних слоев, остающихся более горячими и текучими. В результате ближе к центру лавовой трубки поток лавы еще идет, даже когда верхние слои уже остыли (рис. 6).

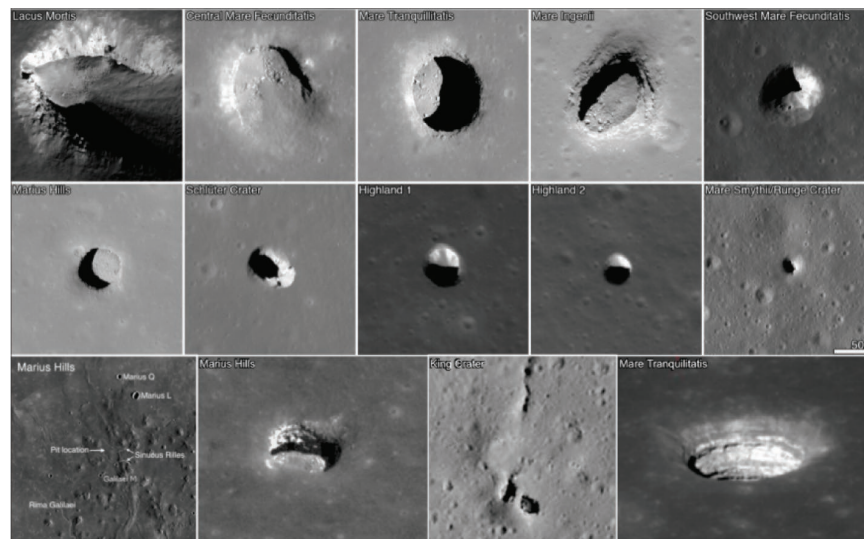


Рис. 5. Элемент каталога зафиксированных геологических образований на поверхности Луны

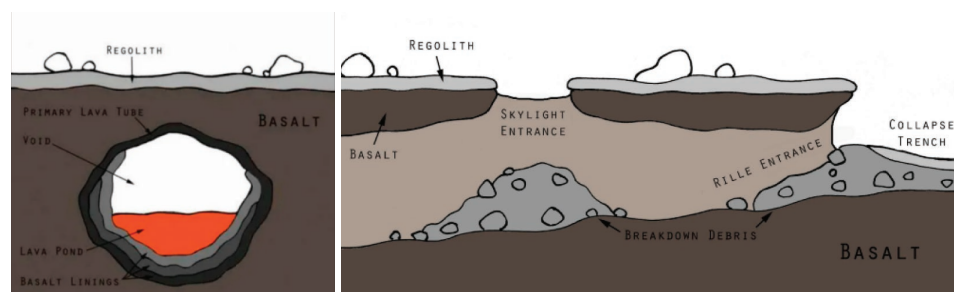


Рис. 6. Характеристика процесса образования лавовых труб

По мере дальнейшего остывания лавы толщина этой корки увеличивается, замедляя скорость остывания лавы внутри лавовой трубки. И даже когда источник лавы иссякает, содержимое трубки продолжает сползать вниз под уклон, формируя за собой пустоты, которые и называют лавовыми трубками. Выходя из трубки, лава часто оставляет за собой открытый проход на одном из ее концов. Лавовые трубки могут содержать различные минеральные отложения, которые обычно принимают форму корки или мелких кристаллов [14].

Как показывают исследования на Земле, лавовые трубки могут достигать 14–15 метров в ширину и находиться на глубине от 1 до 15 метров под поверхностью. При этом, общая длина участков лавовых трубок может быть очень большой и иногда достигает километра.

Учитывая, что протяженность лавовых трубок измеряется от десятков до сотен метров и более, а толщина покрывающего слоя может достигать 10 м, внутренние пространства этих лавовых трубок могут стать естественным укрытием от проникающей радиации, экстремальных температур и метеоритных ударов, а также значительно упростить систему поддержания климата. Так на поверхности естественного спутника Земли температура регулярно изменяется от  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а на Марсе перепад температур может составлять около  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  и более. В это время в лавовых трубках Луны уже в паре метров от ее поверхности круглосуточно и круглогодично царит температура в 30 градусов ниже нуля по Цельсию. По данным ряда ученых, среда в лавовой полости лишена пыли. Это также поможет решить одну из серьезнейших проблем освоения Луны.

Еще одним важным фактором является вероятное нахождение в лунных лавовых туннелях большого количества отложений в виде водяного и углекислого льда, либо породы, содержащей указанные вещества в большой концентрации. А это значит, что люди, пребывающие в указанных условиях, могут быть обеспечены водой и полезным минеральным сырьем, которое вероятно использовать для получения метана. Таким образом, и воду, и ракетное топливо, и окислитель можно будет получать на Луне в местах относительно безопасных для длительного нахождения человека [15].

Важным отрицательным фактором постоянного проживания в лавовых туннелях является недостаточное количество естественного освещения (солнечного света). Этот фактор представляет существенную проблему и при проведении инженерного обследования указанных геологических объектов в условиях планетарной ночи.

К сожалению, отождествление земных лавовых образований и лунных лавовых трубок сегодня возможно лишь с помощью идентификации ряда косвенных признаков, например, по наличию обрушенного верхнего покрытия, и пока имеет высокую степень неопределенности. Научные исследования, устанавливающие закономерности развития напланетных лавовых образований, проводятся в условиях изучения активной вулканической деятельности в различных регионах нашей планеты, в том числе на Камчатке [16].

Как будет показано далее, приоритетным условием безопасного размещения элементов напланетной базы и оценки масштабов будущих проектно-строительных работ является наличие всей полноты информации о пространственной геометрии объемов лавовых трубок (пещер), а также прочностного состояния покрывающего слоя, что возможно лишь при их комплексном инженерном обследовании.

### **Методы обследования лавовых лунных туннелей**

Современный уровень развития методов инженерно-геодезических изысканий, применимых для исследования сложных пространственно-геологических образований, каковыми являются лавовые туннели, предполагает комплексное использования ряда технологий. С одной стороны, они объективно являются инновационными, а с другой – их прототипы уже достаточно проработаны на Земле в различных географических, природно-климатических и конкретных объектовых условиях. В определенной части данные технологии также реализованы в составе программно-аппаратных комплексов современных исследовательских спутников и планетоходов.

В качестве основных инженерных технологий следует указать:

- 1) Фотовидеосъемку (в том числе стереоскопическую) в оптическом диапазоне при наличии заданной освещенности объектов;
- 2) наземное (НЛС), воздушное (ВЛС) и мобильное (МЛС) лазерное сканирование;
- 3) георадарное сканирование (ГС);
- 4) инфракрасную (мультиспектральную) съемку;
- 5) ультрафиолетовую съемку;
- 6) СВЧ-радиометрию и др.

*Лазерное сканирование* является комплексным инновационным методом, объединяющим лидарные технологии, пространственное позиционирование на базе высокоточных инерциально-навигационных и спутниковых систем, а также программно-технические методы цифровой обработки облака точек лазерных отражений [17]. Реализация метода позволяет проводить пространственно-технический мониторинг объектов любой геометрической сложности и территорий большой протяженности с целью получения их актуальной высокоточной цифровой 3D-модели.

*Георадарное сканирование* предназначено для получения пространственных и атрибутивных данных о подповерхностных областях территории (объекта), не видимых в оптическом диапазоне (скрытых препятствиями) – например, картографирование лавовых туннелей посредством проведения измерений через их своды с поверхности планеты (рис. 7).

*Инфракрасная съемка (ИК)* – метод получения информации о пространственном и тепловом состоянии объекта на основании дистанционного измерения параметров его температурных полей (регистрации инфракрасного



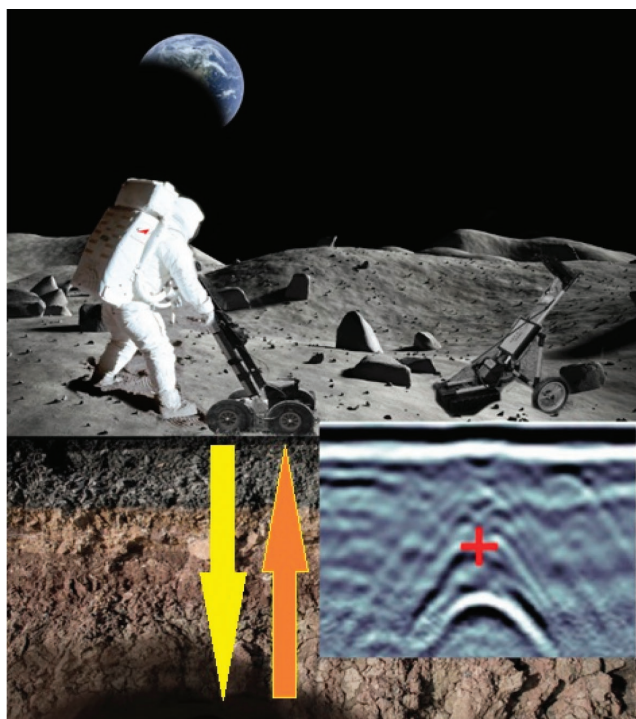


Рис. 7. Применение георадаров на Луне для поиска и картографирования геологических пустот под ее поверхностью

спектра излучения объекта либо отраженной им тепловой энергии) в диапазоне длин волн 0,9–14 мкм.

*Ультрафиолетовая съемка (УФ)* – фиксация электромагнитного излучения (объектов, природных и техногенных аномалий) в спектральном диапазоне длин волн в интервале от 10 до 380 нм (между видимым и рентгеновским спектром). Может использоваться с целью обнаружения источников вредных УФ-излучений (отраженного ультрафиолетового излучения) в составе систем неразрушающего контроля, а также, например, с целью выявления объектов инопланетной флоры и фауны, не видимых в оптическом и ИК-диапазонах.

*СВЧ-радиометрия* – инструментарий дистанционного зондирования, позволяющий производить измерения энергии в микроволновом диапазоне (на частотах от 1 до 1000 ГГц). Часто СВЧ-радиометры используются совместно с другими инструментами дистанционного зондирования – лидарами и (или) радаром. Анализ излучения микроволнового диапазона в интервале от 1 до 300 ГГц дает возможность использования этой дополнительной информации к съемке в видимом и инфракрасном диапазонах и получать данные о таких характеристиках, как температура, относительная влажность и наличие (содержание) воды.

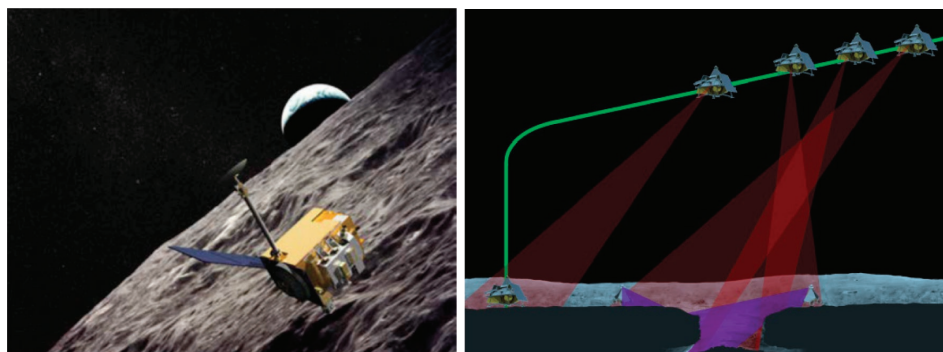
Особенностью применения указанных выше методов обследования поверхности Луны является возможность их реализации как в ручном (с участием космонавтов-исследователей), так и в автоматическом режиме, посредством использования специальной напланетной техники, включая мобильные, в том числе антропоморфные коллаборативные роботы.

В настоящее время в ряде стран на территории специальных полигонов, имитирующих лунную поверхность, проводятся натурные эксперименты по исследованию лавовых туннелей и пещер. Оработке при этом подлежат как сами технологии, так и способы повышения эффективности их будущего комплексного напланетного применения.

Интересными в этом смысле являются результаты научно-прикладного исследования НАСА совместно с Carnegie Mellon University (с 2014 г.), проводимого в целях будущего освоения лунных лавовых туннелей с применением различной роботизированной техники [18].

В их основу был положен принцип выбора наиболее подходящего варианта применения напланетных средств в зависимости от исходных (первичных) характеристик и морфологии объекта. Указанные параметры могут быть получены как с помощью орбитальных космических средств мониторинга, так и в случае предварительных измерений, проводимых на этапах снижения и посадки лунного модуля в конкретном районе, подлежащем детальному изучению (рис. 8). В конечном виде общая последовательность этапов работ выглядит следующим образом (рис. 9).

На *первом этапе* происходит орбитальный сбор общей информации и классификация возможных геологических образований на поверхности планеты с целью выделения наиболее приоритетных из них по заданным критериям выбора. Данный этап во многом выполнен для Луны и достаточно проработан для Марса.



а) орбитальная съемка объекта и предварительное определение исходных параметров

б) получение более точной информации об объекте на этапах снижения и посадки

Рис. 8. Способы предварительной разведки объекта напланетного мониторинга



Рис. 9. Этапность осуществления лунных исследовательских миссий

*Второй этап* предполагает использование низкоорбитальных космических аппаратов и (или) посадочных лунных модулей, обеспечивающих дистанционный сбор высокоточной информации о морфологии элементов лунных лавовых туннелей (входов, провалов, прилегающей территории и пр.) с использованием многоканальных бортовых инструментальных комплексов. Данные мониторинга передаются на Землю с целью их последующей обработки и экспертного анализа [19].

*Третий этап*, как правило, начинается на избранном для непосредственного обследования геологическом объекте с применением доставленных с помощью посадочного модуля (используемого на втором этапе), универсальных напланетных исследовательских средств (НИС). В альтернативном случае используются специально доставляемые роботизированные системы, точная спецификация оборудования которых уточняется на Земле на основании данных, полученных на втором этапе.

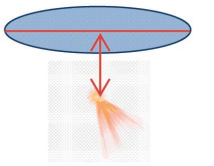
Начало контактного обследования напланетных геологических образований с целью получения достаточной информации, обеспечивающей включение в процесс космонавтов-исследователей (и тем более космонавтов, взаимодействующих с коллаборативными роботами, – *четвертый этап*), осуществляется после выбора основного способа доставки датчиков (средств измерения) в тело лунного лавового туннеля.

Основные способы перемещения исследовательских комплексов (технологии спуска НИС и обеспечения контактного обследования туннелей), определяемые особенностями прилегающего рельефа, формой и глубиной провала, характеристиками породы и пр., рассматриваемые в настоящее время, проиллюстрированы в табл. 1.

Следует указать, что главной инженерной технологией, помимо традиционных и универсальных – видеосъемки и фотографирования, представляющих большую часть информации об объектах мониторинга как на Земле, так и на Луне, является *лазерное сканирование*.

Это инновационный метод активных измерений, получающий все большее признание в различных сферах человеческой деятельности, будь то инженерные изыскания в строительстве, неразрушающий пространственно-технический контроль сложных инфраструктурных объектов, беспилотный транспорт или военное дело [20].

Таблица 1

1	Одиночный спуск НИС по прямой или галсами с обходом препятствий по высоте или направлению на пологих склонах туннеля		
2	Спуск двух (трех) НИС с поочередной фиксацией каждого на склоне с целью взаимной подстраховки		
3	Спуск (подъем) НИС (специальных датчиков), управляемых из безопасного места вне туннеля одним роботом на склоне		
4	Индивидуальный спуск НИС со страховкой тросом, закоренном на входе в лунный туннель		
5	«Тирольский» спуск – с помощью троса, закрепленного на противоположных краях вертикального колодца туннеля на поперечном тросе с лебедкой		
6	Снижение НИС с помощью специальной авиационной платформы на реактивной тяге, либо использование реактивных ранцев космонавтов		
7	Спуск с помощью специальных пневмоустройств		
8	Высокоточное прилунение спускаемого аппарата непосредственно в лоно предварительно разведанной пещеры большого размера (кратер)		

*Лидар* как основа лазерных сканирующих систем (ЛСС), получающих уникальные высокоточные цифровые пространственные данные, находит современную реализацию в гражданской, военной, космической и иных областях. При этом, что показано на рис. 10, именно в космической сфере существует целый пласт прикладных направлений использования лидаров, для которого потребуются, в самой ближайшей перспективе, разработки и внедрения номенклатуры (товарной линейки) этих высокотехнологических программно-аппаратных комплексов [21, 22].

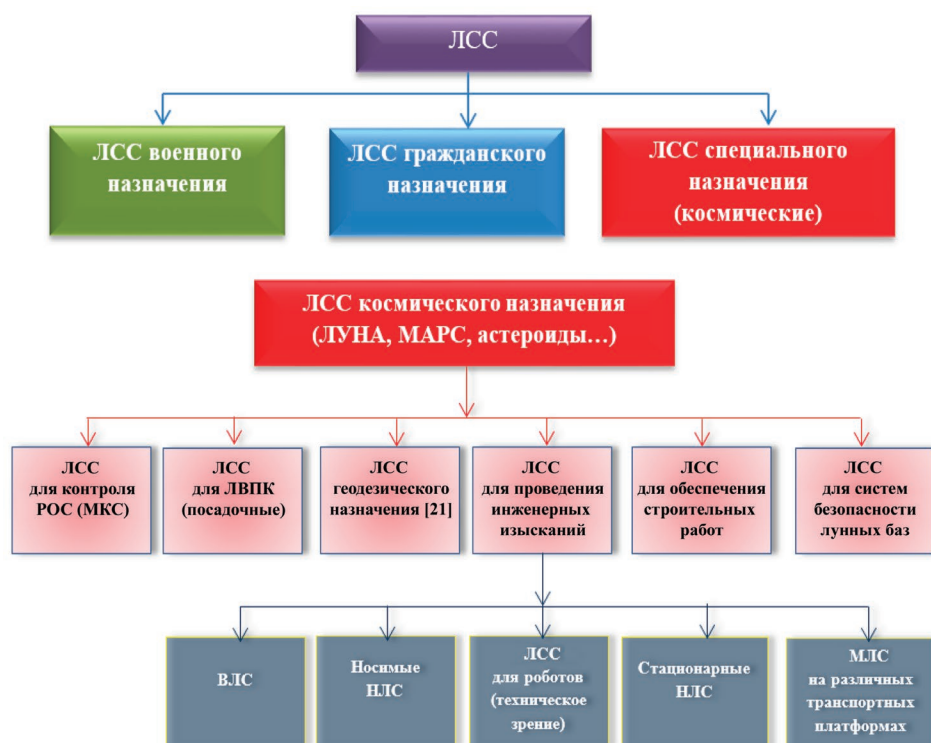


Рис. 10. Классификация ЛСС космического назначения

## Выводы

Лунные лавовые туннели – уникальные геологические образования, имеющие потенциал освоения в качестве укрытия для будущих долговременных космических баз. Их земные аналоги, включая камчатские лавовые туннели, могут стать уникальным естественно-научным полигоном для отработки напланетных технологий освоения и обследования указанных артефактов российскими космонавтами-исследователями с привлечением роботизированной техники и инновационных лазерных сканирующих систем.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Микрин Е.А. Научно-технические проблемы реализации проекта «Пилотируемые космические системы и комплексы» // Космическая техника и технологии. – 2019. – № 3(26). – С. 5–19.
- [2] Пилотируемые полеты: от Ю.А. Гагарина к МКС и полетам в дальний космос / С.К. Крикалёв, Б.И. Крючков, А.А. Курицын // Пилотируемые полеты в космос. – 2011. – № 2(2). – С. 6–20.
- [3] Внеземная архитектура 19.06.2018: 9 проектов лунных колоний. Текст: электронный // URL: <https://naked-science.ru/article/nakedscience/vnezemnaya-arhitektura-9> (дата обращения: 28.10.2021).
- [4] Космическая экспансия России. Когда никто нам не указ... Текст: электронный // URL: <https://zen.yandex.ru/media/dbk/kosmicheskajaia-ekspansiia-rossii-kogda-nikto-nam-ne-ukaz-6022b869dbee57324901a668> (дата обращения: 28.10.2021).
- [5] Новые планы НАСА по высадке роботов и экипажей на Луну. Текст: электронный // URL: <https://www.nasaspacesflight.com/2019/08/nasa-advances-robotic-crewed-moon-landings/> (дата обращения: 28.10.2021).
- [6] Управление программой НАСА для миссий Артемиды. Текст: электронный // URL: <https://www.oversight.gov/sites/default/files/oig-reports/IG-21-004.pdf> (дата обращения: 28.10.2021).
- [7] Майборода А.О. Долговременная лунная база с искусственной гравитацией и минимальной массой конструкции / Воздушно-космическая сфера. – 2019. – № 3. – С. 36–43.
- [8] Проекты лунных баз: вчера и сегодня. Текст: электронный // URL: <https://habr.com/ru/post/384095/> (дата обращения: 28.10.2021).
- [9] Защитный купол обитаемой станции на поверхности Луны / Пыжов А.М., Сеницын Д.А., Янов И.В., Лукашова Н.В., Багров А.В., Леонов В.А. // Воздушно-космическая сфера. – 2019. – № 3(100). – С. 44–49.
- [10] Майборода А.О. LUNDUST – орбитальный экскаватор для лунных старателей // Воздушно-космическая сфера. – 2018. – № 4(97). – С. 85–93.
- [11] Определение архитектуры миссии и технологий для разведки лунной лавовой трубы / Сэмюэл В. Ксименес, Джо Эллиотт, О. Баннова. // Материалы 13-й конференция аэрокосмического подразделения ASCE по проектированию, строительству и эксплуатации в сложных средах, Пасадена, Калифорния; 15–18/4/2012. Текст: электронный // URL: [https://www.researchgate.net/publication/268589369\\_Definng\\_a\\_Mission\\_Architecture\\_and\\_Technologies\\_for\\_Lunar\\_Lava\\_Tube\\_Reconnaissance](https://www.researchgate.net/publication/268589369_Definng_a_Mission_Architecture_and_Technologies_for_Lunar_Lava_Tube_Reconnaissance) (дата обращения: 28.10.2021).
- [12] Электронный каталог «Планетарные названия». Текст: электронный // URL: <https://planetarynames.wr.usgs.gov/Page/MOON/target> (дата обращения: 28.10.2021).
- [13] Zbigniew Sawlowicz “A SHORT REVIEW OF PYRODUCTS (LAVA TUBES)” Текст: электронный // URL: <https://geojournals.pgi.gov.pl/asgp/article/view/32382> (дата обращения: 28.10.2021).
- [14] Александр Березин. «Лунная гонка пополам с гонких теорий. Почему успех освоения Луны прямо зависит от «битвы гипотез» о ее происхождении?» Текст: электронный // <https://nauka.tass.ru/buduschee/6816386>.
- [15] Heather L. Jones «Using Planned View Trajectories to Build Good Models of Planetary Features under Transient Illumination». The Robotics Institute Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213. May 2016. 170 с. Текст: электронный//

- URL:[https://kilthub.cmu.edu/articles/thesis/Using\\_Planned\\_View\\_Trajectories\\_to\\_Build\\_Good\\_Models\\_of\\_Planetary\\_Features\\_under\\_Transient\\_Illumination/6724193](https://kilthub.cmu.edu/articles/thesis/Using_Planned_View_Trajectories_to_Build_Good_Models_of_Planetary_Features_under_Transient_Illumination/6724193) (дата обращения: 28.10.2021).
- [16] Слезин Ю.Б. Вулканоспелеология и лавовые пещеры Камчатки // Вопросы географии Камчатки. – 2008. – Вып. 12.
- [17] Куликов И.Н. Использование технологии лазерного сканирования в сфере прикладной космонавтики // Материалы XIII Международной научно-практической конференции 13–15 ноября 2019 года. – С. 27–28.
- [18] Картографирование планетных пещер с помощью автономной разнородной команды роботов. Аммар Хусейн, Хизер Джонс, Баладжи Каннан, Уланд Вонг, Тьяго Пиментел, Сара Танг, Шреяш Дафтри, Стивен Хубер и Уильям Л. Уиттакер. Документы аэрокосмической конференции IEEE, март, 2013 г. Текст: электронный // URL: [https://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/2013/3/Multibot.pdf](https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2013/3/Multibot.pdf) (дата обращения: 28.10.2021).
- [19] Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). Текст: электронный // URL: <https://lunar.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 28.10.2021).
- [20] Куликов И.Н. Лазерные сканирующие устройства и их использование в перспективных лунных миссиях // Пилотируемые полеты в космос. – В печати.
- [21] Куликов И.Н., Орешкин Г.Д. Создание и применение местных геодезических систем координат на Луне // Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос», ноябрь, 2021 г.
- [22] Об информационной поддержке действий экипажа с помощью сканирующего лидара при посадке пилотируемого лунного модуля / Крючков Б.И., Куликов И.Н., Бурдин Б.В. // Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос», ноябрь, 2021 г.

## REFERENCES

- [1] Mikrin E.A. Scientific and Engineering Problems Involved in the Implementation of the Project “Manned Space Systems and Complexes” // Space Engineering and Technology. – 2019. – No 3 (26). – pp. 5–19.
- [2] Manned Spaceflight: from Yu.A. Gagarin to the ISS and Deep-space Missions / S.K. Krikalev, B.I. Kryuchkov, A.A. Kuritsyn // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2011. – No 2 (2). – pp. 6–20.
- [3] Extraterrestrial Architecture 19.06.2018: 9 Projects of Lunar Colonies. Text: online // URL: <https://naked-science.ru/article/nakedscience/vnezemnaya-arhitektura-9> (accessed date: 28.10.2021)
- [4] Space expansion of Russia. When no one decides for us... Text: online // URL: <https://zen.yandex.ru/media/dbk/kosmicheskaiia-ekspansiiia-rossii-kogda-nikto-nam-ne-ukaz-6022b869d6ee57324901a668> (accessed date: 28.10.2021)
- [5] New NASA Plans to Land Robots and Crews on the Moon. Text: online // URL: <https://www.nasaspacesflight.com/2019/08/nasa-advances-robotic-crewed-moon-landings/> (accessed date: 28.10.2021)
- [6] NASA Program Management for Artemis Missions. Text: online // URL: <https://www.oversight.gov/sites/default/files/oig-reports/IG-21-004.pdf> (accessed date: 28.10.2021)
- [7] Maiboroda A.O. Permanent Lunar Base With Artificial Gravity and Minimum Structural Mass / Aerospace Sphere Journal. – 2019. – No 3. – pp. 36–43.
- [8] Lunar base projects: in past and present. Text: online // URL: <https://habr.com/ru/post/384095/> (accessed date: 28.10.2021)

- [9] Protective Dome of the Manned Lunar Base / Pyzhov A.M., Sinitsyn D.A., Yanov I.V., Lukashova N.V., Bagrov A.V., Leonov V.A. // Aerospace Sphere Journal. – 2019. – No 3(100). – pp. 44–49.
- [10] Mayboroda A.O. LUNDUST – Orbital Excavator for Moon Miners // Aerospace Sphere Journal. – 2018. – No 4(97). – pp. 85–93.
- [11] Defining mission scenario and technologies for exploration of lunar lava tube / Samuel W. Ximenez, Joe Elliott, O. Bannova // Proceedings of the 13<sup>th</sup> ASCE Aerospace Division Conference on Design, Construction and Operation in Complex Environments, Pasadena, California; 15–18/4/2012. Text: online // URL: [https://www.researchgate.net/publication/268589369\\_Definng\\_a\\_Mission\\_Architecture\\_and\\_Technologies\\_for\\_Lunar\\_Lava\\_Tube\\_Reconnaissance](https://www.researchgate.net/publication/268589369_Definng_a_Mission_Architecture_and_Technologies_for_Lunar_Lava_Tube_Reconnaissance) (accessed date: 28.10.2021).
- [12] E-catalog “Planetary Names”. Text: online // URL: <https://planetarynames.wr.usgs.gov/Page/MOON/target> (accessed date: 28.10.2021).
- [13] Zbigniew Sawlowicz “A SHORT REVIEW OF PYRODUCTS (LAVA TUBES)” Text: online // URL: <https://geojournals.pgi.gov.pl/asgp/article/view/32382> (accessed date: 28.10.2021).
- [14] Alexander Berezin “Lunar Race Mixed With Race of Theories. Why is the success of the exploration of the Moon directly dependent on the “battle of hypotheses” about its origin?” Text: online // <https://nauka.tass.ru/budushee/6816386>.
- [15] Heather L. Jones “Using Planned View Trajectories to Build Good Models of Planetary Features under Transient Illumination”. The Robotics Institute Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213. May 2016. 170 c. Text: online // URL: [https://kithub.cmu.edu/articles/thesis/Using\\_Planned\\_View\\_Trajectories\\_to\\_Build\\_Good\\_Models\\_of\\_Planetary\\_Features\\_under\\_Transient\\_Illumination/6724193](https://kithub.cmu.edu/articles/thesis/Using_Planned_View_Trajectories_to_Build_Good_Models_of_Planetary_Features_under_Transient_Illumination/6724193) (accessed date: 28.10.2021).
- [16] Slezin Yu.B. Volcanospeleology and Lava Caves of Kamchatka // Issues of Kamchatka Geography. – 2008. – Issue 12.
- [17] Kulikov I.N. The Use of Laser Scanning Technology in Applied Astronautics // Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference “Manned Space Flights”, November 13–15, 2019. – pp. 27–28.
- [18] Mapping planetary caves using autonomous different-type robots. Ammar Hussein, Heather Jones, Balaji Kannan, Uland Wong, Thiago Pimentel, Sarah Tang, Shreyansh Daftry, Stephen Huber and William L. Whittaker. IEEE Aerospace Conference Papers, March 2013. Text: online // URL: [https://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/2013/3/Multibot.pdf](https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2013/3/Multibot.pdf) (accessed date: 28.10.2021).
- [19] Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). Text: online // URL: <https://lunar.gsfc.nasa.gov/> (accessed date: 28.10.2021).
- [20] Kulikov I.N. Laser Scanners and Their Use in Future Lunar Missions // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – In press.
- [21] Kulikov I.N., Oreshkin G.D. Creation and Application of Local Geodetic Coordinate Systems on the Moon // Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference, Yu.A. Gagarin CTC, November, 2021.
- [22] Information Support of Crew Actions Using a Scanning Lidar During Landing of a Manned Lunar Module / Kryuchkov B.I., Kulikov I.N., Burdin B.V. // Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference, Yu.A Gagarin CTC, November, 2021.

*Окончание следует*