

ОБЗОРЫ

OVERVIEWS

УДК 629.784:523.3 + 629.7.058.43

DOI 10.34131/MSF.22.1.98-118

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАВОВЫХ ТУННЕЛЕЙ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛУННЫХ МИССИЯХ (*Часть 2*)

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 2). 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.

Реализация технологий лазерного сканирования в условиях Луны

Как показано в части I (рис. 12), направление использования лазерных сканирующих систем (ЛСС) в условиях напланетной деятельности имеет большое число практических приложений и потенциально потребует разработ-

ки нового научно-прикладного кластера в сфере цифровых космических технологий. Это обусловлено большим функциональным разнообразием указанных систем, эксклюзивностью решения задачи пространственного позиционирования лидара в условиях иных планет, объективной необходимостью технической адаптации мобильного, воздушного и наземного лазерного сканирования (МЛС, ВЛС и НЛС) к работе в новой обстановке функционирования и, прежде всего, связанной с энергетическими проблемами автономной напланетной деятельности.

Рассмотрим возможные направления реализации инновационных технологий, основанных на сканирующих лидарах, в том числе при проведении специальных инженерных изысканий на поверхности естественного спутника Земли.

Следует указать на отдельные особенности ЛСС, которые в условиях напланетной деятельности являются несомненными достоинствами указанных систем:

- отсутствие зависимости от общей и локальной освещенности объекта (территории), что позволяет проводить съемку на темной стороне планеты (в ночное или сумеречное время), в лунных туннелях или пещерах без использования дополнительных источников света;

- большая дальность сканирования при высоком пространственном разрешении съемки, что позволяет производить бесконтактный мониторинг поверхности Луны и объектов на ней на безопасных удалениях от опасных геологических образований (провалов, оползней, разломов и т. п.);

- высокая скорость сканирования и практически круговая диаграмма направленности съемки, что позволяет оперативно получать информацию об объекте (территории) и обновлять данные с высокой скважностью;

- большая относительная точность лазерных измерений, обеспечивающая высокую внутреннюю сходимость решения геодезических задач внутри системы «лидар–объект»;

- возможность осуществления внешней привязки цифровых ЛСС в различных глобальных системах координат с использованием различных радиотехнических, оптоэлектронных, радиолокационных и иных средств навигации (позиционирования), что обеспечивает универсальность их напланетного применения;

- малый вес и небольшой технологический объем оборудования ЛСС, позволяющий реализовать его на различных транспортных платформах, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), а также путем переноса всего съемочного комплекса непосредственно космонавтом-исследователем.

А) *Эффективное применение ЛСС в составе оборудования низкоорбитальных космических спутников.* В условиях отсутствия атмосферы на Луне возможно выполнять полет на минимально безопасных высотах (дальностях), обеспечивающихся баллистическими расчетами условий полета, а также характером рельефа местности планеты [1]. Основная задача приме-

нения ЛСС на данном этапе – дистанционное картографирование лунной поверхности и получение оперативных, актуальных и точных цифровых пространственных данных об объекте исследования. Существующие картографические материалы, используемые в настоящее время и полученные на основе традиционной фотограмметрии, не до конца удовлетворяют требованиям выявления (определения) параметров расчетной посадочной площадки лунных взлетно-посадочных комплексов (ЛВПК) на поверхности планеты (в форме эллипса с полуосями 15 км на 30 км [2]). Получение достоверных данных о поверхности Луны с характеристиками, установленными техническим заданием, возможно только на базе применения сканирующих лазерных систем, аналогичных ВЛС.

Расчеты, выполненные на основе характеристик лучших образцов современных серийных воздушных лазерных сканеров для высот круговой безопасной траектории облета Луны с наклоном, обеспечивающим заданное перекрытие областей сканирования лидара на каждом витке, продолжительностью около 108,9 мин, показывают возможность надежного получения сплошного облака точек лазерного отражения (около 2 точек на 1 м²). Расчеты по съемке для безопасных круговых орбит облета Луны высотой от 15 км до 50 км выполнены с учетом разницы высот между самыми высокими и самыми низкими точками лунной поверхности, достигаемой 18,1 км. Учитывая это, а также влияние аномалий Луны в виде масконов, для указанных высот лунной орбиты, возможно надежно обеспечить пространственное разрешение поверхности цифрового двойника естественного спутника Земли равное 0,75–1,5 м.

При этом следует понимать, что съемочное лазерное оборудование перспективных космических миссий может быть значительно эффективнее, чем современные системы гражданского назначения, рассматриваемые в ходе сравнительного анализа, при всей понимаемой специалистами совокупности ограничений, конструктивных сложностей и основных проблем, связанных с адаптацией ВЛС для космоса [3].

Б) *Применение ЛСС на этапе расчетного снижения и посадки ЛВПК на лунную поверхность.* Две основные задачи, решаемые при этом с использованием сканирующих лидаров, состоят в:

– получении предварительной высокоточной пространственно-технической информации о потенциальном объекте (объектах) исследования на этапе снижения ЛВПК (рис. 10, б, части I);

– обеспечении условий автоматического выбора заданной (или оптимальной в конкретных условиях посадки) точки прилунения и информационное сопровождение космического экипажа до посадки ЛВПК на поверхность планеты с учетом выбранного тактического маневра (возможный вариант – табл. 1, п. 8, части I).

Оптимизация траектории снижения ЛВПК и его посадки в заданной точке расчетного эллипса прилунения как основная задача второго этапа реали-

зуется на основе высокоточной и актуальной цифровой модели Луны (первый этап) с разрешением не хуже 1 м, а также выбора совокупности основных и запасных посадочных площадок в заданной (приполярной) области спутника Земли с использованием множества критериев оптимизации: размер территории, критические уклоны местности, наличие (отсутствие) сложных геологических образований на поверхности, ее физические характеристики и пр.

Сканирующий лидар(ы), используемый(е) в целях обеспечения посадки на Луну, представляет собой адаптированный вариант ВЛС. При интеграции излучателя сканера в конструкцию ЛВПК следует учесть возможность его затенения внешними элементами модуля, что может быть компенсировано установкой нескольких излучателей, либо заданным разворотом корабля вокруг его вертикальной оси на траектории снижения с целью достижения максимального угла поля зрения лидара [4].

Инновационное техническое решение задачи применения ЛСС в составе оборудования ЛВПК возможно осуществить путем размещения на внешней поверхности посадочного модуля излучателя(ей) сканирующего лидара, имеющего специальную круговую (спиралевидную) развертку лазерных лучей (рис. 1).

Автоматическое управление указанным устройством с целью наведения его главной оптической оси в центр заблаговременно выбранного посадочного эллипса позволит итерационно решить главную навигационную задачу приземления ЛВПК за расчетное время снижения посадочного модуля.

По мере уменьшения высоты комплекса объективно повышается количество точек лазерного отражения на единицу поверхности выбранного эллипса, достигая величины пространственного разрешения (точек на кв. м), обеспечивающей автоматическое обнаружение (выявление) препятствий (объектов) на поверхности планеты с геометрическими размерами 15 см и менее, что следует из требований разработчиков отечественной лунной программы [5].

Указанная информация непрерывно обрабатывается бортовым компьютером лунного модуля при его снижении с целью постоянного уточнения расчетной точки прилунения и одновременно отображается на экране у космонавтов, визуализирующем местность Луны в заданном районе и указанное место посадки на фоне цифровой модели рельефа (ЦМР) (рис. 2).



Рис. 1. Отечественные экспериментальные лазерные сканирующие системы с вертикальной (круговой или спиралевидной) разверткой луча



а) визуализация места прилунения ЛВПК на первичной модели

б) расчет места точной посадки и его визуализация на фоне ЦМР

в) уточнение и визуализация места точной автоматической посадки

Рис. 2. Информационная поддержка экипажа на этапе снижения и прилунения

В случае отказа системы автоматического управления лунного взлетно-посадочного комплекса использование данных сканирующего лидара позволит экипажу выполнить посадку в директорном или ручном режиме управления, независимо от возможных препятствий визуального наблюдения планеты из-за пылевого облака, ограничивающего непосредственный оптический контакт экипажа с Луной.

Важнейшим требованием адаптации ВЛС к условиям лунной деятельности, подлежащим отдельному глубокому исследованию, помимо поддержки заданного температурного режима работы сканера, а также учета (обеспечения) его массогабаритных и энергетических характеристик, является оценка влияния излучения двигательной посадочной установки на условия прохождения лазерного импульса. Учитывая ограниченное среднее время снижения ЛВПК на конечном участке траектории (около 1 мин), помехи от постоянно действующего пламени реактивной струи двигателей могут оказать существенные помехи работе лидара.

Данная технология как элемент системы технического зрения, базирующаяся на прямом активном высокоточном измерении пространственных характеристик множества точек поверхности и интеллектуальной обработке полученных образов, является наиболее эффективным инновационным средством обеспечения безопасной посадки. Обработка данных лидарной съемки, в связи с их оперативным использованием на динамических этапах посадки, естественно должна выполняться с помощью высокопроизводительной компьютерной станции непосредственно на борту ЛВПК.

В) *Проведение* инженерно-геодезических и координатная поддержка инженерно-геологических, инженерно-экологических и других видов изысканий на поверхности других планет могут быть эффективно обеспечены методами космического мобильного и напланетного лазерного сканирования, являющихся адаптированными земными технологиями – МЛС и НЛС. Значительная часть документов по организации российской лунной программы [6] посвящена работе первых напланетных экспедиций, связанной с созданием условий функционирования космонавтов на Луне, а также начальному цик-

лу строительства стационарной лунной базы. Важным элементом указанной деятельности является организация и проведение различных видов специальных инженерных изысканий, обязательно предшествующих любому виду строительства, а тем более связанному с освоением лунных туннелей, созданием укрытий сложной пространственной формы, рытьем котлованов, обвалованию техники и оборудования, использованию естественных складок местности, возвышенностей и др.

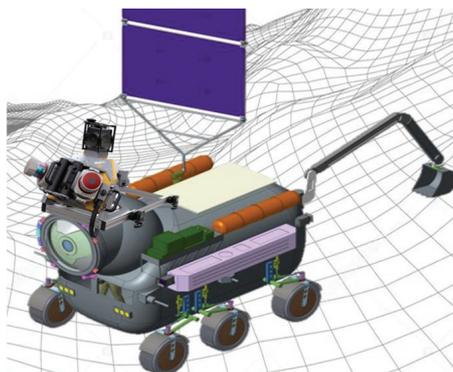
Указанная деятельность, особенно в условиях освоения лунной поверхности при отсутствии атмосферных искажений, может и должна строиться на основе применения таких опробованных в строительной сфере и доказавших свою эффективность систем, как НЛС (адаптированные лунные (напланетные) лазерные сканеры) и адаптированные МЛС (мобильные лазерные сканеры).

Характеристики и особенности указанных систем промышленного исполнения позволяют выполнять пространственные облачные измерения с целью формирования общей для потребителей пространственной модели объекта работ (участка, территории, района, а в перспективе – всей лунной поверхности). Таким образом, результатом изыскательских работ на поверхности Луны с использованием лидарной съемки должна стать единая пространственная модель (ЕПМ) территории работ – геодезически привязанное облако точек лазерных отражений, являющееся цифровым двойником обследованного рельефа, местности и объектов на ней [7, 8].

Адаптированная технология МЛС может быть реализована на любой транспортной базе используемых напланетных подвижных средств, в частности, на «Лунных роверах», роботизированных тележках [9], а также на платформе ПГЛ (пилотируемого герметичного лунохода) [10] (рис. 3).



а) оборудование МЛС на роботизированной тележке NASA (Калифорния, 2014)



б) вариант оборудования ПГЛ «классическим» мобильным лазерным сканером

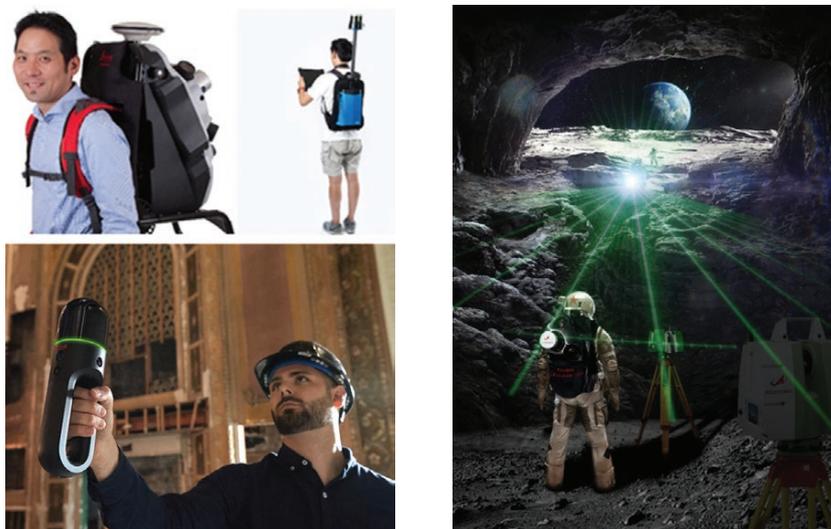
Рис. 3. Реализация технологии мобильного лазерного сканирования

В состав лунного МЛС должен быть включен лазерный излучатель(и), помещенный в специальный термокожух, блок автономного электропитания сканера и система управления лидаром, обеспечивающая задание режимов съемки и хранение данных в цифровом виде. Указанная информация подлежит последующей обработке после ее передачи на Землю, либо с применением программно-аппаратных средств непосредственно в вычислительном центре (ВЦ) будущей стационарной лунной базы. Визуализация текущей информации от МЛС может осуществляться непосредственно экипажу (оператору) ПГЛ, а полные данные съемочного дня (суток) – накапливаться на борту (или в ВЦ) для последующей передачи на Землю с целью их интеграции в единую пространственную модель Луны.

Адаптированная технология НЛС реализуется на основе использования напланетных (наземных) сканирующих систем стационарного типа, размещаемых космонавтами-исследователями на геодезических штативах, либо (при оборудовании территории лунных баз) устанавливаемых на специальных мачтах совместно с другими оптико-электронными системами.

Современные НЛС в условиях земной атмосферы позволяют выполнять круговую либо секторную съемку на дальности до 300 м и более, работать без замены элементов питания до 2 ч и накапливать несколько сотен Гб первичной информации [11].

Одним из инновационных направлений развития метода НЛС является исполнение лазерных сканеров в виде носимых измерительных устройств рюкзачного типа (рис. 4).



а) современные варианты реализации носимых наземных лазерных сканеров

б) использование лазерного сканера в космическом варианте носимого оборудования

Рис. 4. Варианты применения технологии НЛС



а) использование различных спусковых технологий, включая реактивные ранцы

б) групповой спуск в лунный лавовый туннель, ранее обследованный роботом

Рис. 5. Проведение лазерной съемки с участием космонавтов-исследователей

Это своеобразный, условно переходный тип лазерных сканирующих систем от стационарных НЛС к МЛС. Они обладают простотой, присущей НЛС, и определенной динамикой съемки, характеризующей технологии МЛС и ВЛС. Объем и вес оборудования (на Земле – до 15 кг, а на Луне – около 2 кг) позволяют эффективно интегрировать указанное устройство в напланетные скафандры космонавтов-исследователей и в будущем стать неотъемлемой частью системы их «технического зрения», наряду с видео- и ИК-съемкой (рис. 5).

Использование НЛС рюкзачного типа позволяет эффективно решать уникальные задачи обследования лунных лавовых туннелей (пещер) с целью определения их пригодности для размещения в данных пустотах элементов инфраструктуры будущих лунных баз. Информация со сканеров, в виде пространственной 3D-модели, может оперативно визуализироваться космонавту непосредственно от входа в пещеру (независимо от времени суток и наличия естественного освещения) с целью обеспечения его дальнейшего перемещения, а также накапливаться в компьютере по мере передвижения исследователя(ей) в туннелях и затем обрабатываться камерально. Существуют способы объединения таких сканов, сделанных отдельными наблюдателями, либо сшивка «облаков точек» нескольких последовательных сеансов съемки. В результате получается полноценная пространственная облачная модель с высоким (миллиметровым) разрешением всех ее элементов – своеобразный цифровой двойник лунной пещеры, который может быть транслирован на Землю (долгосрочную лунную базу) и стать основой ее последующей векторизации в интересах проектирования и строительства различных инфраструктурных объектов (формы представления указанных данных будут рассмотрены в следующем разделе).

Г) Важнейшей проблемой, подлежащей разрешению в ходе развертывания российской лунной миссии, является *обеспечение единой координатной*

поддержки всех пользователей путем создания (расчета и технического оборудования) местной и (или) глобальной системы координат.

Идеология миссии и все расчеты, приведенные в современных документах космической отрасли, строятся на необходимости создания и использования в целях обеспечения лунных и окололунных объектов средствами навигации и связи, разрабатываемой глобальной лунной системой спутниковой навигации и связи (ЛССНС) (рис. 6) [12].

Она должна стать окололунной спутниковой системой, предназначенной для обеспечения всех лунных и окололунных потребителей данными, используемыми для решения вопросов высокоточной космической и напланетной навигации, ориентации космических кораблей, их сближения и посадки, а также непрерывной двухсторонней командной, голосовой и телевизионной связи. ЛССНС создается на базе существующих систем ГЛОНАСС, GPS, Галилео и BeiDou, представляющих собой навигационную инфраструктуру системы. ЛССНС состоит из 12 малых спутников, устанавливаемых на орбитах в двух взаимортогональных плоскостях с наклоном 90° и радиусом 6000 км.

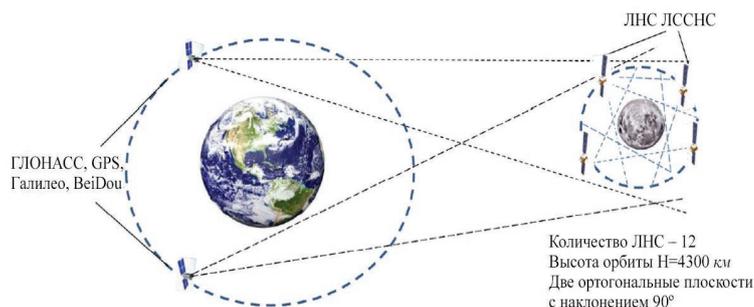


Рис. 6. Вариант построения ЛССНС на базе существующих навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, Галилео и BeiDou

Учитывая большой срок и высокую стоимость разработки указанных систем, предлагается использовать свойства лидарных технологий для создания предварительных условий начала изыскательских работ на Луне на основе местных локальных координатных систем. Применение ЛСС и базовых методов традиционной геодезии совместно с астрономической геодезией могут позволить гарантированно обеспечить деятельность лунной миссии до этапа развертывания ЛССНС, а также стать резервной напланетной навигационной системой в случае отказа глобальной ЛССНС.

Предлагаемый вариант решения задачи навигационного лунного обеспечения (далее НЛО) базируется на способах создания местных геодезических сетей на Земле и обусловлен следующими ограничениями:

– в первые годы построения и промышленной эксплуатации Луны не потребуются проведение удаленных миссий (более 50–100 км от базы);

- организация НЛО должна строиться на принципе минимизации финансовых и материальных ресурсов;
- система должна обеспечивать абсолютную точность (внутреннюю сходимость) модели (ЕПМ) не хуже, чем ЛССНС;
- НЛО должно базироваться на известных и отработанных автономных земных технологиях, малозатратных материально (как весовая отдача доставляемых грузов на Луну) и энергетически экономичных;
- НЛО должно технически, программно и методически обеспечивать все навигационные решения и результаты работы рассмотренных выше адаптированных систем лазерного сканирования – НЛС, МЛС и ВЛС.

Последовательные этапы создания НЛО выглядят следующим образом:

а) *Закладка* элементов будущей ортодромической (прямоугольной) сети.

После посадки первых лунных экспедиций космонавты физически оборудуют и маркируют на территории будущей базы, либо в потенциальном направлении развития ее деятельности, типовой закладной центр местной сети НЛО. С использованием астрономических навигационных приборов определяется (выбирается) направление главного меридиана сети (ось X).

б) *Оборудование* приоритетных элементов сети.

С помощью исходной картографической основы, полученной на основе ранее проведенной съемки Луны (с точностью по месту и по высоте не хуже, чем 1 м) оборудуются (закладываются физически и маркируются 3–4 (по аналогии с земной геодезией) триангуляционных пункта) в местах видимых возвышенностей на устойчивой дальности их прямой видимости. Определяются астрономические координаты указанных элементов.

в) *Техническое оснащение*.

После геодезического уравнивания элементов сети производится их техническое оснащение по двум вариантам оборудования:

1 – *полуавтоматическая сеть*: объекты маркируются светильниками и уголковыми отражателями, если планируется осуществлять навигацию и измерения внутри сети с помощью автоматизированных интегрированных электронно-оптических тахеометров, устанавливаемых на всех подвижных транспортных средствах, кроме авиационных. Они служат для периодической (псевдопостоянной) коррекции их местоположения при автономной навигации транспортных средств (или их подвижных элементов). Результаты измерений и данные коррекции фиксируются в базе (базах) данных НЛО и визуализируются на индивидуальных и групповых планшетах управления инфраструктурой базы в местной прямоугольной системе координат. Возможен обмен указанными данными по каждому из абонентов посредством радиомодемов с целью формирования общей обстановки и обеспечения безопасности работ.

2 – *автоматическая сеть*: инновационная технология, требующая оборудования каждого из узлов сети (базовых станций – БС₁) стационарным лазерным излучателем, источником электропитания на солнечной батарее

и аккумуляторах, а также радиомодемом. Они необходимы для обеспечения непрерывной работоспособности ЛСС, физически закрепленных и геодезически привязанных накаркасных элементах местной сети (рис. 7) [13].

Каждая из базовых станций (НЛС) осуществляет круговое или секторное сканирование территории лунной базы (локальной территории, участка ЕПМ) с целью определения (идентификации) подвижных элементов сети и ее транспортной инфраструктуры (включая БПЛА), а также их пеленгации (высокоточного определения X_i ; Y_i ; H_i). Полученные данные от каждой базовой станции (BC_i) непрерывно (по кодированному запросу) передаются с помощью радиомодема в Единый центр обработки данных сети и адресно каждому из зарегистрированных в сети абонентов (либо им всем одновременно).

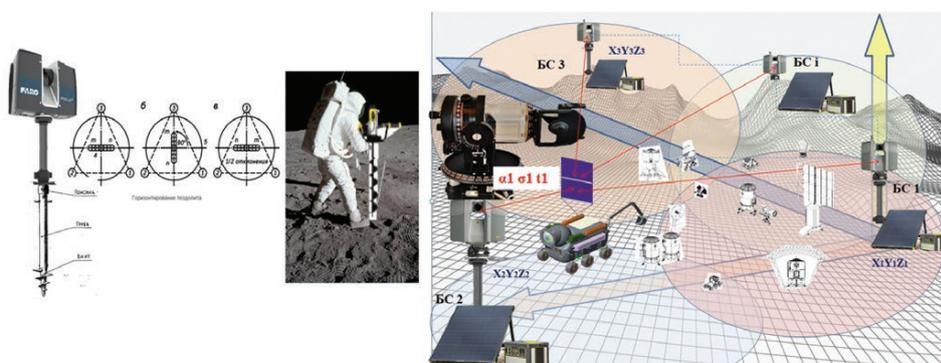


Рис. 7. Вариант организации и оборудования местной геодезической сети на Луне

Таким образом, каждое подвижное транспортное средство обладает высокоточной актуальной (с темпом обновления данных – менее 1 с) внутренней навигационной информацией, используемой как космонавтами-операторами лично, так и в интересах средств их интеллектуальной поддержки (экспертных систем), реализуемых, в том числе, на основе нейросетей различного назначения.

Указанная технология позволяет развиваться геодезической сети, обслуживающей данную ЕПМ как наружу, так и внутрь за счет сгущения ее элементов (при необходимости).

Плановое оборудование локального пространства размещения первой лунной базы возможно осуществить даже на основе одной базовой станции (BC_1), развертываемой в геометрическом центре строительной площадки. При этом рабочая площадь местной относительной системы координат с вершиной в BC_1 составит не менее 12 кв. км. Для обеспечения общей рабочей площади сети более 20 кв. км (на основе геодезического треугольника, близкого к равностороннему, со сторонами около 2 км) потребуется развертывание и закрепление не менее трех базовых станций (BC_1 , BC_2 , BC_3).

Внутренняя точность позиционирования любых объектов, оборудованных лазерными уголковыми отражателями и специальными приемниками геодезических координат от каждой из базовых станций, внутри сети (вблизи БС) составляет менее 1 см, а на внешних границах сети – около 4...5 см (при импульсном методе измерения дальности лидаром в условиях отсутствия атмосферы на Луне).

Абсолютная точность позиционирования элементов сети в случае осуществления их астрономической привязки современными средствами ориентирования составит менее 50 м [14].

Указанные точности соответствуют наземным требованиям осуществления координатной поддержки проведения любых строительных работ (М 1:100; 1:500), а также могут использоваться при решении задач планирования полета и расчета баллистики транспортных космических кораблей будущих миссий посещения (обеспечения) данной лунной базы [15].

Виды представления и направления использования результатов лидарной съемки для организации строительства лунных баз в лавовых туннелях

Важным элементом любой измерительной технологии является форма представления результатов проводимых измерений и обследований.

Учитывая масштаб и глобальность съемочной территории, представление рельефа Луны для решения задач первичной оценки местности целесообразно выполнять в виде *GRID*-модели, представляющей собой регулярную матрицу значений высот, полученную при интерполяции исходных данных (ограниченного числа точек прямых измерений). *GRID* – геореляционная модель и фактически – это сетка (*grid* (*англ.*) – сетка), размеры которой задаются в соответствии с требованиями точности конкретной решаемой задачи (рис. 8). Регулярная сетка высот должна соответствовать характеру лунной поверхности и учитывать разрешение полученного (первичного) изображения. Итак, *GRID*ы представляют собой поверхности, построенные по регулярно распределенным точкам.

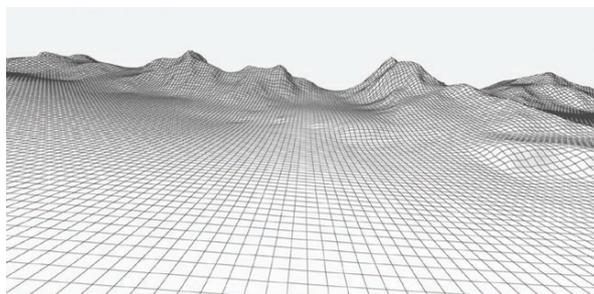


Рис. 8. Первичное представление поверхности Луны в формате *GRID*, полученного на основе данных орбитальной станции

В процессе создания регулярной сети высот очень важным является учет плотности сетки (шаг сетки), определяющий ее пространственное разрешение. Чем меньше выбранный шаг, тем более точной является ЦМР – выше пространственное разрешение модели, но тем большим является количество узлов сетки, а значит, требуется более значительное время для расчета ЦМР и больше места резервируемой памяти на диске. К примеру, при уменьшении шага сети в 2 раза происходит возрастание объема потребной компьютерной памяти в 4 раза. Модель в формате *GRID* достаточно простая, ее обработка обычно более эффективна, чем у других моделей. Хорошо разработанные алгоритмы обработки *GRID*ов в массе своей проистекают из методов обработки растровых изображений, и они относительно дешевы. С другой стороны, регулярная структура данных не в полной мере подходит для описания сильно изменчивой поверхности (потеря информации в промежутках между точками регулярной сетки или ее избыточность в случае плавно изменяющихся поверхностей). Кроме того, базовая структура *GRIDA* не позволяет точно и адекватно показать линейные объекты с резким и существенным изменением их вертикальных размеров в ГИС-приложениях, когда требуются крупные масштабы (например, на конечном, предпосадочном этапе снижения ЛВПК).

Камеральную обработку материалов лазерной съемки Луны, учитывая ее глобальность, целесообразно производить на Земле после посадки исследовательского модуля, доставившего данные ЛСС.

Проблема обработки данных лидарной съемки ЛВПК, в связи с их непосредственным оперативным использованием на посадке, как показано выше, должна решаться с помощью высокопроизводительной компьютерной станции непосредственно на борту космического модуля. При этом рациональным методом обработки и представления данных ЛСС, реализуемым на данном этапе полета ЛВПК в связи с жесткими требованиями, предъявляемыми к модели местности и рельефа, является *TIN* (метод построения нерегулярных триангуляционных сетей, или *Triangular Irregular Networks*) [16].

Этот метод используется в геоинформационных приложениях уже в течение многих лет и является эффективным способом высокоточного цифрового отображения структуры сложных поверхностей. *TIN* является формой векторных цифровых географических данных, которые строятся методом триангуляции набора вершин (точек). Вершины соединяются серией ребер и формируют сеть треугольников. Существуют различные методы интерполяции при формировании этих треугольников (например, триангуляция *Делоне*). Ребра *TIN* формируются как непрерывные, непересекающиеся треугольники, которые могут использоваться для определения положения линейных пространственных объектов, играющих важную роль в построении поверхностей любой степени сложности. На рис. 9 показаны узлы, ребра и грани *TIN*-модели.

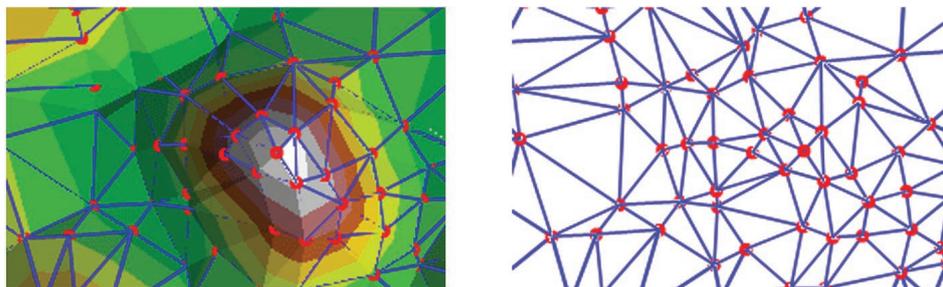


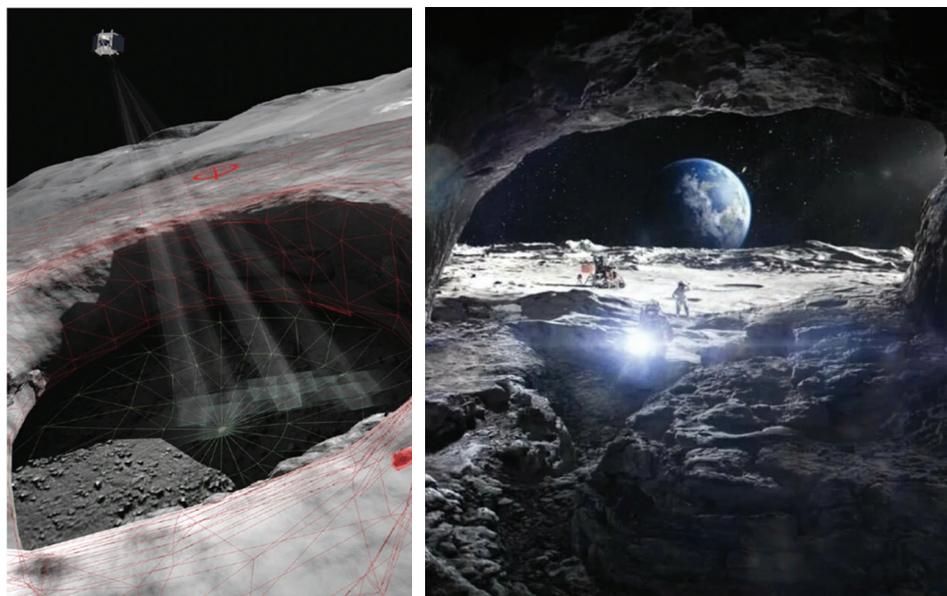
Рис. 9. Представление ЦМР в виде TIN-модели

Поскольку узлы могут располагаться на поверхности неравномерно, *TIN* имеет более высокое разрешение в областях, где поверхность крайне неравномерна или нужна большая детализация и более низкое разрешение в областях с однородной поверхностью.

Входные пространственные объекты (точки прямых измерений), используемые для создания *TIN*, остаются на тех же местах, где располагаются узлы и ребра *TIN*. Это позволяет *TIN* сохранить высокую точность входных данных при одновременном моделировании значений, расположенных между известными точками облака сканирования. Единицами измерения *TIN* являются футы или метры, но не десятичные градусы. Модели *TIN* не так широко доступны, как растровые модели поверхностей (*GRID*), и, как правило, их построение и моделирование несколько продолжительней (дороже) из-за сложности структуры обработки *TIN*, по сравнению с растровыми данными. Сети *TIN* обычно применяются для моделирования небольших областей с очень высокой точностью, например в инженерных приложениях в строительстве, где их использование позволяет проводить высокоточное вычисление планиметрической площади, площади поверхности и строительных объемов.

Максимально допустимый размер *TIN*-модели в настоящее время варьируется в зависимости от свободных непрерывных ресурсов памяти системы. При нормальных условиях работы с 32-разрядной ОС *Windows* максимально возможный достижимый размер модели составляет от 10 до 15 миллионов узлов *TIN*. Для повышения оперативности обработки данных в *TIN* рекомендуется ограничить размеры обрабатываемой площади несколькими миллионами узлов в целях удобства их пользования и увеличения производительности операционной системы.

Следует сказать, что характеристики современных компьютеров обеспечивают решение задач *TIN*-моделирования ЦМР в масштабах посадочного эллипса с полуосями 30 км на 15 км за расчетное время снижения и посадки ЛВПК и тем более при плановой напланетной деятельности по инженерному обследованию объектов роботами или непосредственно космонавтами с применением МЛС и НЛС (рис. 10).



а) моделирование главного входа в лунный лавовый туннель на спуске ЛВПК

б) лазерная съемка главного входа в лунный лавовый туннель с использованием НЛС

Рис. 10. Использование ЛСС в зависимости от топологии лунных туннелей

Подводя итог вышесказанному, можно констатировать, что инструментарий лидарных технологий, объединяющий возможности получения и представления данных о лунной поверхности и объектов на ней, позволяет решать весь класс задач, стоящих перед изыскателями при проектировании, строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений как на земле, так и на других планетах вне зависимости от масштабов и сложности работ (рис. 11):

- выполнение комплекса пространственных измерений (геодезических работ), необходимых для составления и сопровождения проекта по строительству;
- определение на местности положения основных осей и границ сооружений, а также других их характерных точек в соответствии с проектами строительства;
- обеспечение геометрических форм и размеров элементов объектов, зданий и сооружений на местности в соответствии с его проектом в процессе строительства;
- обеспечение геометрических условий установки и наладки специального оборудования;
- установление отклонений элементов сооруженного объекта от его проекта;



а) временный экспедиционный лагерь для пребывания внутри лавовой трубы

б) футуристический проект стационарной космической базы – сложного распределенного инженерного инфраструктурного объекта

Рис. 11. Размещение элементов лунных баз на основе данных лидарной съемки

- изучение деформаций основания и тела сооружения, происходящих под действием различных нагрузок, под влиянием внешних факторов и деятельности человека;

- определение расположения на поверхности планеты (или в ее недрах) отдельных объектов, элементов и характеристик, представляющих интерес для исследователей.

Проблема получения и представления пространственной метрической информации о лунных лавовых туннелях, пещерах и иных образованиях с заданной точностью и детальностью на основе технологии лазерного сканирования во всех случаях решается посредством разработки 3D-модели объекта (местности) (рис. 12). Для современного инженера-исследователя это, прежде всего, предоставление следующих возможностей (рис. 13):

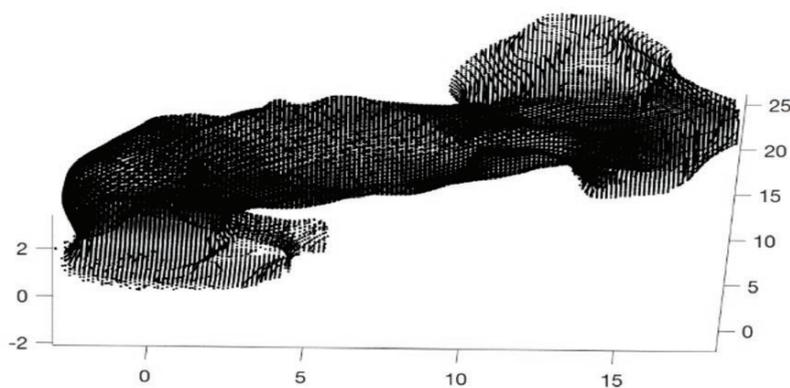


Рис. 12. Пространственная модель лавовой трубы, полученная объединением сканов



Рис. 13. Компьютерная модель площадки лунной базы
(фаза инженерной разведки с начальными объектами инфраструктуры)

- трехмерное представление объективно более наглядно для любого пользователя-проектировщика, строителя, оператора и др.;
- наличие третьего измерения в виде координаты, а не атрибута, позволяет значительно расширить спектр и уровень автоматизации решаемых задач;
- детальность получаемой ЛСС информации настолько высока, что позволяет на трехмерных моделях отобразить элементы сооружений, которые ранее не могли учитываться;
- универсальное цифровое представление модели позволяет значительно ускорить процесс принятия решений при возникновении различных нестандартных ситуаций и оперативном изменении плана строительства путем автоматизации процессов управления и использования единого набора данных (атрибутивной информации, классификаторов и пр.) модели;
- трехмерные модели позволяют получить привычный базовый набор электронной технической документации в виде планов и строительных чертежей.

Часто проведение лазерных измерений в подземных полостях (пещерах, туннелях, подповерхностных галереях) является единственным способом получения надежной пространственной топографической и картографической информации (при невозможности проведения классической фотограмметрии, в условиях наличия магнитных аномалий, в случае непрохождения сигналов спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS, отсутствии освещения и т. п.). При этом эффективность ЛСС подтверждается:

- высокой точностью измерений координат объекта (местности);
- полнотой и детальностью сбора информации;
- проведением измерений без физического контакта с объектом (неразрушающий метод сбора информации);
- высокой степенью автоматизации измерений (изысканий);

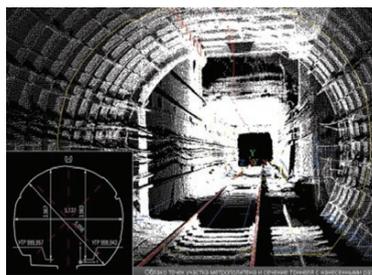
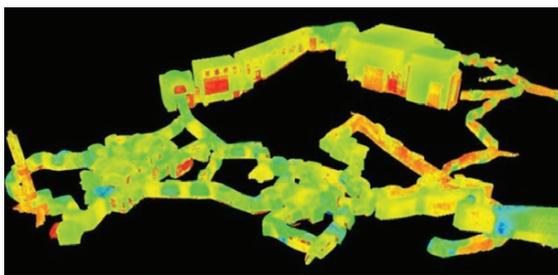
- возможностью съемки при любых условиях освещения;
- значительным сокращением всех видов трудозатрат и общего времени производства полевых работ.

Успешный опыт промышленного применения ЛСС в области инженерного обследования, в том числе подземных сооружений, многократно подтвержден работами в московском метро, съемкой пещер Киево-Печерской лавры, изысканиями в Северо-муйском туннеле, разработками карьеров в Якутии и пр. (рис. 14) [17, 18]. Он может быть востребован космической отраслью, особенно при проведении наземных предполетных экспериментов с космонавтами-исследователями как логическое продолжение ранее проведенных научных изысканий [19].

Любая профессиональная деятельность космических экипажей, тем более лунные напланетные исследования должны быть предварительно отработаны в земных условиях. Это требование является основополагающим принципом подготовки космических экипажей, проводимой в НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина. Существует ряд природных полигонов, в том числе на территории Дальневосточного региона Российской Федерации, где уместно организовать специальные полевые испытания перспективных отечественных ЛСС и отработку способов (навыков) безопасного эффективного инженерного обследования реальных лавовых туннелей, аналогичных лунным, а также проработать тактику действий российских космонавтов на различных этапах реализации лунной программы.

В соответствии с материалом, изложенным выше, представляется необходимым, чтобы в новые перспективные направления общей и профильной подготовки космонавтов-исследователей были включены следующие учебные курсы:

- основы инженерных изысканий в строительстве и проектировании типовых инженерных сооружений на Луне;



а) подземное лазерное сканирование и моделирование туннелей Киево-Печерской лавры, 2008 г.

б) НЛС при реконструкции метро Рижская Москва, 2021 г.

Рис. 14. Примеры проведения туннельной съемки лазерным сканером

- теория и практика проведения исполнительной трехмерной съемки туннелей, кратеров, геологических образований, а также специальных напланетных инженерных сооружений;
- решение задач определения объемов пещер, отвалов, котлованов, туннелей и выемок на основе данных ЛСС;
- профилирование и определение деформации различных туннелей на основе поколений данных лидарной съемки и применения специальных лазерных датчиков;
- основы геодезической, геологической и промышленной съемки;
- основы топографической съемки местности, карьеров, туннелей, открытых выработок и шахт;
- основы проведения пространственного мониторинга состояния зданий, сооружений и иных объектов распределенной напланетной инфраструктуры будущих космических (лунных) баз;
- создание цифровых моделей сложных технологических объектов и др.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Митин А.Т., Митина А.А. Траектории полета космических аппаратов к Луне. Идеи К.Э. Циолковского: прошлое, настоящее, будущее // Материалы XLVII научных чтений памяти К.Э. Циолковского. – Калуга, 2012. – С. 342–344.
- [2] Первая и двадцать пятая. Текст: электронный // <https://habr.com/ru/post/497164/> (дата обращения: 28.10.2021).
- [3] Куликов И.Н. Лазерные сканирующие устройства и их использование в перспективных лунных миссиях // Пилотируемые полеты в космос.– 2021. – № 4. – С. 57–74.
- [4] Об информационной поддержке действий экипажа с помощью сканирующего лидара при посадке пилотируемого лунного модуля / Куликов И.Н., Крючков Б.И., Бурдин Б.В. // Материалы XIV Международной научно-практической конференции, 2021. – С. 20–22.
- [5] Жуков В.М. Анализ условий, особенностей и способов выполнения операций визуально-инструментального наблюдения и фотосъемки на Луне // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – № 2(39). – С. 111–131.
- [6] Лунная программа. Текст: электронный // <https://www.roscosmos.ru/tag/lunnaja-programma/> (дата обращения: 28.10.2021).
- [7] А. Русланов, А. Рогачев. Прощай, топокарта! // Армейский сборник. Журнал Министерства обороны РФ. – 2018. – № 9. – С. 56–62.
- [8] Александр Русланов, Алексей Рогачев. Единая электронная картографическая основа. Проблемы и перспективы. Текст: электронный // <https://www.comnews.ru/content/112766/2018-04-23/edinaya-elektronnaya-kartograficheskaya-osnova-problemy-i-perspektivy-aleksandr-ruslanov-sovetnik-generalnogo-direktora-ooo> (дата обращения: 28.10.2021).
- [9] Ровер ищет воду в пустыне Калифорнии для имитации будущих лунных миссий. Текст: электронный // <https://sservi.nasa.gov/articles/rover-searches-california-desert-for-water-to-simulate-future-lunar-missions/> (дата обращения: 28.10.2021).
- [10] Цели и задачи первых экспедиций на Луну. Текст: электронный // <https://unnatural.ru/tips-moon> (дата обращения: 28.10.2021).

- [11] Комиссаров А.В. Теория и технология лазерного сканирования для пространственного моделирования территорий. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Комиссаров Александр Владимирович. Сибирский государственный университет геосистем и технологий (СГУГиТ). – Новосибирск, 2015. – 278 с.
- [12] Концепция околорунной навигации. В.Е. Чеботарев, В.И. Кудымов, В.И. Звонарь, А.А. Внуков, А.В. Владимиров. Текст: электронный // <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-okololunnoy-navigatsii/viewer>. (дата обращения: 28.10.2021).
- [13] Куликов И.Н., Орешкин Г.Д. Создание и применение местных геодезических систем координат на Луне // Материалы XIV Международной научно-практической конференции, 2021.
- [14] О возможности применения астрономических методов навигации для обеспечения пилотируемых полетов к Луне / А.И. Кондрат, А.А. Митина, Г.Д. Орешкин, А.И. Шуров // Материалы Девятого Международного Аэрокосмического Конгресса IAC'18, посвященного 30-летию успешного полета орбитального корабля «Буран». Тезисы докладов МГУ им. М.В. Ломоносова (28–31 августа 2018 года. Москва, Россия). – С. 428–429.
- [15] Построение высокоточной селенодезической системы координат на физической поверхности Луны с помощью светодиодных маяков, расположенных на ее поверхности / Ширенин А.М., Мазурова Е.М., Багров А.В. // Космические исследования. – 2016. – Т. 54, № 6. – С. 493–498.
- [16] Использование GRID и TIN для анализа и моделирования пространственных объектов, процессов и явлений. Текст: электронный // <https://geo.bsu.by/images/pres/soil/gisopt/gisopt05.pdf> (дата обращения: 28.10.2021).
- [17] Сканирование Киево-Печерской лавры. Текст: электронный // <https://ngc.com.ua/info/skanirovaniye-kiyev-pecherskoy-lavry.html> (дата обращения: 28.10.2021).
- [18] Кольцов П.В., Иванов Ю.С. Практика использования технологий лазерного сканирования в наблюдениях за деформацией бортов карьеров. Текст: электронный // <https://art-geo.ru/solution/monitoring-bortov-karerov-metodom-lazernogo-skanirovaniyz> (дата обращения: 28.10.2021).
- [19] Миссии-аналоги ЕКА, проводимые в интересах осуществления пилотируемых полетов в дальний космос: CAVES, PANGAEA, ENVIHAB, ESOL / П.П. Долгов, Е.Ю. Иродов, В.С. Коренной, Ю.И. Онуфриенко // Пилотируемые полеты в космос. – 2019. – № 2(31). – С. 96–113.

REFERENCES

- [1] Mitin A.T., Mitina A.A. Flight Trajectories of Spacecraft to the Moon. K.E. Tsiolkovsky's Notions: Past, Present and Future // Proceedings of the XLVII Scientific Conference Dedicated to the Memory of K.E. Tsiolkovsky. – Kaluga, 2012. – pp. 342–344.
- [2] The First and Twenty-Fifth. Version: electronic // <https://habr.com/ru/post/497164/> (accessed date: 28.10.2021).
- [3] Kulikov I.N. Laser Scanning Devices and Their Use in Future Lunar Missions // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2021. – No 4. – pp. 57–74.
- [4] Information Support of Crew Procedure Using Scanning Lidar During Landing of a Manned Lunar Module / Kulikov I.N., Kryuchkov B.I., Burdin B.V. // Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference, 2021. – pp. 20–22.

- [5] Zhukov V.M. Analysis of the Conditions, Features and Methods of Performing of Visual-Instrumental Observation and Photographic Operations on the Moon // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2021. – No 2(39). – pp. 111–131.
- [6] Lunar Program. Version: electronic // <https://www.roscosmos.ru/tag/lunnaja-programma/> (accessed date: 28.10.2021).
- [7] A. Ruslanov, A. Rogachov. Farewell, Topographic Map! // Army Collected Volume. Journal of the Ministry of Defense of the Russian Federation. – 2018. – No 9. – pp. 56–62.
- [8] Alexander Ruslanov, Alexey Rogachev. Unified Electronic Cartographic Basis. Issues and Prospects. Version: electronic // <https://www.comnews.ru/content/112766/2018-04-23/edinaya-elektronnaya-kartograficheskaya-osnova-problemy-i-perspektivy-aleksandr-ruslanov-sovetnik-generalnogo-direktora-ooo> (accessed date: 28.10.2021).
- [9] Rover Searches California Desert for Water to Simulate Future Lunar Missions. Version: electronic // <https://sservi.nasa.gov/articles/rover-searches-california-desert-for-water-to-simulate-future-lunar-missions/> (accessed date: 28.10.2021).
- [10] Goals and Objectives of the First Expeditions to the Moon. Version: electronic // <https://unnatural.ru/tips-moon> (accessed date: 28.10.2021).
- [11] Komissarov A.V. Theory and Technology of Laser Scanning for Spatial Modeling of Territories. Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences / Komissarov Alexander Vladimirovich. Siberian State University of Geosystems and Technologies. – Novosibirsk, 2015. – p. 278.
- [12] The Concept of Circumlunar Navigation. V.E. Chebotarev, V.I. Kudymov, V.I. Zvonar, A.A. Vnukov, A.V. Vladimirov. Version: electronic // <https://cyberleninka.ru/article/n/kontsepsiya-okololunnoy-navigatsii/viewer>. (accessed date: 28.10.2021).
- [13] Kulikov I.N., Oreshkin G.D. Creation and Application of Geodetic Reference Systems on the Moon // Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference, 2021.
- [14] The Possibility of Using Astronomical Navigation Methods to Ensure Manned Flights to the Moon / A.I. Kondrat, A.A. Mitina, G.D. Oreshkin, A.I. Shurov // Proceedings of the 9th International Aerospace Congress IAC'18 Dedicated to the 30th Anniversary of the Successful Flight of the Buran Spacecraft. Book of Abstracts, Lomonosov State University (August 28–31, 2018. Moscow, Russia). – pp. 428–429.
- [15] Development of a High-Precision Selenodetic Coordinate System for the Physical Surface of the Moon Based on Led Beacons on Its Surface / Shirenin A.M., Mazurova E.M., Bagrov A.V. // Cosmic Research. – 2016. – V. 54, No 6. – pp. 493–498.
- [16] Using GRID and TIN for the Analysis and Modeling of Spatial Objects, Processes and Phenomena. Version: electronic // <https://geo.bsu.by/images/pres/soil/gisopt/gisopt05.pdf> (accessed date: 28.10.2021).
- [17] Scanning Kiev-Pechersk Lavra. Version: electronic // <https://ngc.com.ua/info/skanirovaniye-kiyevo-pecherskoy-lavry.html> (accessed date: 28.10.2021).
- [18] Koltsov P.V., Ivanov Yu.S. The Practice of Using Laser Scanning Technologies in Monitoring the Deformation of Open Pit Walls. Version: electronic // <https://art-geo.ru/solution/monitoring-bortov-karerov-metodom-lazernogo-skanirovaniyz> (accessed date: 28.10.2021).
- [19] Analogue Missions Performed in the Interests of Crewed Flights to Deep Space: CAVES, PANGAEA, ENVIHAB, ESOL / P.P. Dolgov, E.Yu. Irodov, V.S. Korennoy, Yu.I. Onufrienko // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2019. – No 2(31). – pp. 96–113.