

Цифровая навигация и обеспечение строительной деятельности на Луне

Игорь Куликов* | Максим Харламов | Борис Крючков
ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звёздный городок, Россия
I.Kulikov@gctc.ru, M.Kharlamov@gctc.ru, B.Kryuchkov@gctc.ru

Аннотация

В настоящее время в большом числе печатных и электронных изданий, включая ряд отечественных и зарубежных научно-исследовательских работ, на суд научной общественности представляются взгляды учёных и конструкторов на будущее пилотируемого освоения Луны, включая возведение напланетных долговременных баз. В этих публикациях предлагаются к рассмотрению вопросы координатного обеспечения напланетной деятельности на Луне. Широкую известность получили предложения российских и зарубежных учёных о создании и размещении на орбите Луны глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), аналогичной ГЛОНАСС/GPS, а также иных спутниковых комплексов, обеспечивающих координатную поддержку потребителей на поверхности искусственного спутника Земли.

Авторы данной статьи, основываясь на требованиях российского законодательства и приводимых ими обоснованиях точности и надёжности навигационного обеспечения на Луне, представляют и детально рассматривают предложения по оборудованию и использованию местных систем координат как альтернативы ГНСС. Лунные навигационные системы должны быть универсальным средством обеспечения космонавтов и напланетных транспортных систем, а также широко использоваться на всех этапах лунного строительства, начиная с первых пилотируемых миссий по освоению Луны.

Ключевые слова

Напланетная навигация, Способы определения координат при строительстве, Обеспечение внекорабельной деятельности на Луне, Геодезия и селенодезия, Строительство лунной базы

Digital Navigation and Support for Construction Activities on the Moon

Igor Kulikov* | Maksim Kharlamov | Boris Kryuchkov
“Yu.A. Gagarin R&T CTC” FSBO, Star City, Moscow Region, Russia
I.Kulikov@gctc.ru, M.Kharlamov@gctc.ru, B.Kryuchkov@gctc.ru

Abstract

Currently, a large number of printed and electronic publications, including a number of domestic and foreign scientific research papers, present to the scientific community the views of scientists and designers on the future of manned lunar exploration, including the construction of long-term planetary bases. In these publications, issues of coordinate support for planetary activities on the Moon are proposed for consideration. The proposals of Russian and foreign scientists on the creation and placement of a global navigation satellite system (GNSS) similar to GLONASS/GPS, as well as other satellite complexes providing coordinate support for consumers on the surface of an artificial satellite of the Earth, have become widely known.

The authors of this article, based on the requirements of Russian legislation and their justifications for the accuracy and reliability of navigation on the Moon, present and consider in detail proposals for the equipment and use of local coordinate systems as an alternative to GNSS. Lunar navigation systems should be a universal means of providing astronauts and alien transport systems, as well as widely used at all stages of lunar construction, starting with the first manned missions to explore the Moon.

Keywords

Planetary navigation, methods of determining coordinates during construction, provision of extravehicular activities on the Moon, geodesy and selenodesia, construction of a lunar base

Введение

Тема освоения Луны становится всё более актуальной и научно проработанной. В настоящее время в публикациях ряда авторов рассматриваются проблемы строительства, а также эксплуатации будущих напланетных космических станций [1, 2, 7, 9, 16, 21, 26, 59].

В большей мере, по ряду объективных причин, это относится к использованию космических баз на Луне, а в меньшей – на Марсе и иных космических телах. Одновременно, в привязке к теме создания и эксплуатации космических лунных и марсианских полигонов, рассматриваются вопросы широкого многоцелевого применения автоматических робототехнических систем (РТС) как средства поддержки пилотируемой деятельности космонавтов [3, 4].

Формализация темы строительства напланетных космических баз требует системного понимания и жёсткого следования ряду принципов, рассмотрению которых, в частности, посвящён данный материал. При организации любого вида строительно-монтажных работ (СМР), в обязательном порядке, должны быть подготовлены или выполнены условия (мероприятия, элементы), установленные нормативно-технической документацией (НТД) и ГОСТами для строительства:

- проведены предпроектные инженерные изыскания;
- разработан проект;
- подготовлены (изготовлены) строительные и комплектующие материалы и компоненты;
- оборудована строительная (монтажная) площадка;
- развёрнуты инженерные сети;
- подготовлены специалисты соответствующей квалификации;
- утверждены обоснованные сводные сметные расчёты и финансирование.

Главным видом работ, обуславливающим успех СМР и эффективность реализации каждой, из показанных выше, позиций, является проведение топографо-геодезического (в нашем случае - селенодезического) обеспечения (ТГО, ТСО) и создание высокоточной универсальной пространственной подосновы будущего строительства [5].

В приложении к теме строительства лунных инфраструктурных объектов, вопросы изготовления и доставки на Луну компонентов будущих космических баз, их монтажа, эксплуатации и ремонта, а также вопросы оценки материальных и финансовых затрат, давно являются предметом научного исследования, как в нашей стране, так и за рубежом [6, 7]. Однако вопросам навигационного обеспечения строительства на Луне, достаточного внимания пока не уделяется.

Виды работ на Луне и необходимая точность позиционирования объектов

Деятельностью по перспективным исследованиям Луны, Марса и иных космических объектов Солнечной системы заняты ряд государств нашей планеты, среди которых следует отметить Россию, страны Евросоюза, США, Китай, Индию и Японию.

Так, в американской космической программе «Артемида» планируется создание орбитальной лунной платформы Lunar Gateway и её интеграция с постоянной космической станцией на поверхности Луны (рис. 1) [8, 9, 59].

В 2023 году Россия подтвердила своё намерение создать Международную научную лунную станцию совместно с Китаем. Соглашением предусмотрен открытый формат проекта - к нему, по мере развития, смогут присоединяться другие государства.

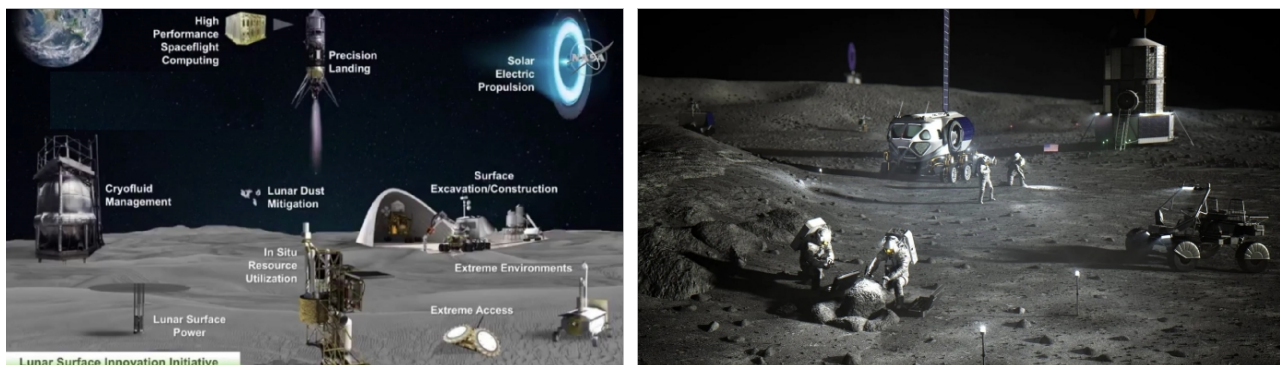


Рис. 1. Планируемая космическая инициатива США в районе южного полюса Луны

На первом этапе страны займутся проектированием станции, а межпланетные космические аппараты (КА) будут исследовать поверхность Луны, чтобы определить наиболее удобное место для размещения базы. На следующей стадии планируется создать интегрированный центр управления станцией и включить в её состав первые инфраструктурные объекты - модули энергоснабжения и связи. Кроме того, на поверхность Луны доставят и запустят исследовательские аппараты различного назначения и луноходы.

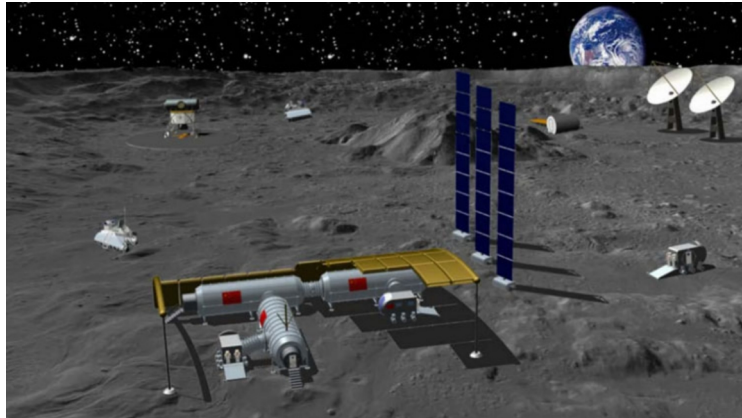


Рис. 2. Перспективная международная лунная станция Китая и России

Третий этап предполагает постепенное увеличение количества лунных модулей и расширение их функционала. На этой стадии лунная станция получит единый командный центр, систему подъёма, спуска и посадки КА (СПСП) и фитотехнический комплекс по выращиванию земных сельскохозяйственных культур. То есть начнут создаваться условия для длительной колонизации Луны (рис. 2) [10, 11].

Япония (JAXA) также планирует начать промышленное освоение Луны после 2030 года с акцентом на строительство завода по производству водородного топлива (рис. 3). При этом, произведённые здесь энергоносители, будут использоваться для перемещения космических аппаратов, как по поверхности спутника, так и на орбитах Луны [12, 13].



Рис. 3. Футуристический японский лунный проект

Анализ доступных материалов по программам освоения Луны, разработанных различными космическими агентствами, позволяет предположить, что в зависимости от этапа их реализации, по мере нарастания количества и сложности выполняемых напланетных задач, а также степени их автоматизации, возникает потребность в получении высокоточных, актуальных и надёжных цифровых данных пространственного положения

объектов, техники, рабочих органов исполнительных механизмов, элементов рельефа и местности.

Следует отметить, что требуемые точности позиционирования для разных видов работ в различных условиях функционирования лунной базы и проведения напланетной деятельности (например, лунный день или лунная ночь, визуальное или приборное ориентирование операторов и пр.), объективно, будут не одинаковы. Прорабатываемые космические задачи (программы исследований) для Луны ставятся и решаются с учётом уровня необходимой и достижимой, на момент реализации, точности навигационного обеспечения. Так, например, для миссии «Луна-28» планируется иметь небольшой луноход, навигация которого осуществляется методом «счисления пути» - по измерению пройденного расстояния с учетом изменений направления движения транспортного средства.

Такая несовершенная координатная маршрутная привязка, дающая ошибку до 5 м на 100 м пройденного пути является вынужденным устаревшим решением, (рис. 4), так как, на данный момент, у разработчиков ещё не имеется иных готовых программно-аппаратных технологий для обеспечения точного измерения положений аппарата на лунной поверхности.

Навигационные задачи для Луны, характеризующиеся потребной координатной точностью позиционирования, можно условно разделить на несколько категорий.

Точность определения координат в разных режимах счисления	
Режим счисления	Погрешность
Инерциальный	3.7 км за час полета
Инерциально-спутниковый	100 м
Инерциально-доплеровский	0.5÷0.7% от пройденного пути
Курсо-доплеровский	1.2÷1.5% от пройденного пути
Аэрометрический	3.5÷4.5% от пройденного пути

Рис. 4. Точностные характеристики различных методов счисления пути

Одна из них относится к программам, выполняемым на месте посадки (или в радиусе единиц метров от него), которые носят общий характер и не требуют проведения каких-либо инженерных работ в конкретной точке лунной поверхности (например, миссия «Луна-25»,

«Луна-26»). Так, на начальном этапе освоения Луны, для выполнения исследований по указанным программам вполне достаточно иметь баллистическое обеспечение попадания космического аппарата в ожидаемый эллипс рассеивания места посадки с точностью не хуже 15 x 30 км [14].

Отдельной важной задачей обеспечения лунных исследований при этом является выполнение безопасного вывода космического аппарата в заданное место над поверхностью спутника и проведение посадки в эту расчётную (выбранную оператором) точку. Локальная задача навигации здесь должна быть решена исключительно методами точного позиционирования КА во время его полета над Луной и на этапе управляемого двигателями спуска. Точность позиционирования для решения поставленной задачи должна быть высокой и сопоставимой с линейным размером посадочного модуля, то есть должна составлять от единицы до десятка метров. Такие высокие требования к навигационной точности при проведении посадки вызваны необходимостью экономии топлива для двигателей торможения и маневрирования, а также сохранения устойчивого пространственного положения посадочного лунного модуля на подстилающей поверхности [14].

Существует ряд методов оптимизации процессов маневрирования КА для выхода в заданную точку и различные технические решения посадки в зависимости от вида подлётной к Луне траектории, а также используемого оборудования (дальномеры, высотомеры, датчики-измерители скорости и угла сноса (ДИСС), лидары и т. п.) [15, 16].

В любом случае, при решении этой задачи требуется иметь систему мгновенного позиционирования лунного посадочного комплекса в селеноцентрических координатах, при этом точность их измерения и перехода от селенографических координат к небесно-механическим должна быть, как сказано выше, лучше десяти метров.

При решении задач сооружения долговременных построек на поверхности Луны процессы СМР ограничены техническими, энергетическими и материальными ресурсами, что связано с дорогостоящей и сложной доставкой грузов с Земли. Так, например, если «прилунить» специальную бурильную установку в место, удалённое от заданной точки исследования (дальше, чем допускает технология развёртывания бурильного оборудования), то это потребовало бы планирования и использования намного более дорогой мобильной установки криогенного или глубокого наклонного бурения, либо задача нивелирования навигационной ошибки решалась бы посредством транспортировки оборудования

луноходом.

В показанном случае, экономический эффект от применения высокоточной навигации на Луне можно оценить, через разницу цены реализации различных альтернативных способов бурения, а также величиной дополнительной стоимости ограниченного ресурса хода напланетной транспортной платформы.

В таблице 1 представлены основные виды планируемых фундаментальных напланетных исследований, реализация которых потребует разработки и системного применения положений «лунных строительных стандартов», «строительных норм и правил» (СНиП) и иной нормативно-технической документации, аналогичной «земной» [17, 18, 19].

Табл.1. Направления фундаментальных научных исследований, требующих высокоточной координатной поддержки

№ пп	Виды перспективных научных исследований	СМР и ТСО
1	Изучение происхождения, внутреннего строения и эволюции Луны как планетного тела	+
2	Мониторинг внутреннего теплового потока Луны	+
3	Мониторинг динамических изменений гравитационного поля Луны во времени	+++
4	Мониторинг лунной сейсмической активности;	+
5	Изучение фундаментальных проблем Солнечной системы	+
6	Исследование активности и состава солнечного ветра и галактических космических лучей	+
7	Определение возможностей использования Луны для изучения Вселенной (внеатмосферная астрономия, исследование потоков античастиц и поиск антиматерии в ближнем космосе и т.д.)	++
8	Мониторинг космического излучения и солнечной активности	+
9	Прогнозирование радиационной обстановки на Луне	+
10	Исследование межзвездной и межпланетной пыли, а также потоков микрометеоритов	+
11	Исследование летучих компонентов (соединений) лунных веществ (минералов), а также изучение возможности их добычи	++
12	Исследование магнитной истории Луны	++
13	Синхронный мониторинг интенсивности и взаимодействия различных типов магнитных полей	+++
14	Комплексное исследование лавовых труб и пещер	++
15	Тематическая селенологическая, селенохимическая и селенофизическая съёмка	+++
16	Топографическое и геоморфологическое картирования перспективных участков местности (районов)	+++
17	Исследование лунного вещества (физико-химические свойства, строение и мощность лунного реголита)	+
18	Исследование приповерхностной экзосферы Луны и мониторинг ее параметров, исследование влияния лунной пыли на технику и живые организмы	+

Примечание: потребность высокоточного позиционирования специального оборудования и научной

аппаратуры: (+) существует; (++) высокая; (+++) очень высокая или это является абсолютным фактором, обуславливающий данный вид деятельности.

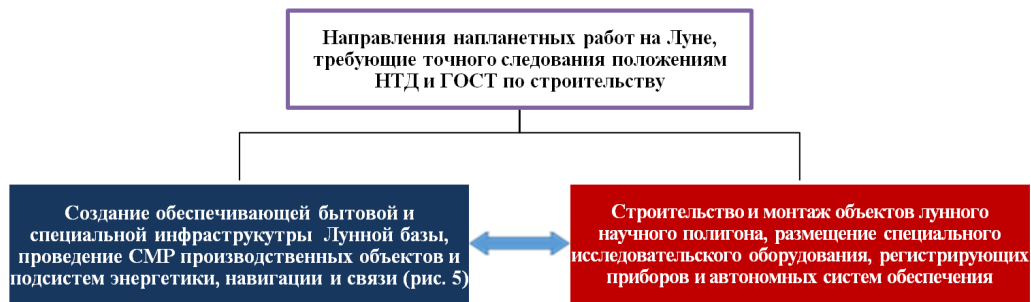


Рис. 5 а. Основные направления напланетной деятельности, понимаемой как строительство

I - Навигационное оборудование и обозначение территории базы и СПСП, формирование складов и логистических участков, прокладка дорожной сети



II - Проведение работ с лунным грунтом, направленных на создание условий проведения монтажа и сборки конструкций элементов базы



III - СМР объектов инфраструктуры, возведение и интеграция сооружений лунной базы: обитаемого, научного, энергетического модулей и т. д.



IV - Обследование, описание, картографирование и инженерное оборудование естественных пустот под поверхностью Луны: местных пещер, туннелей и пр.



Рис. 5 б. Виды напланетных работ по оборудованию космической базы

Понимаемые сейчас направления деятельности на Луне, связанные со строительством и, следовательно, с созданием необходимой селеноподосновы, можно представить как два основных взаимодействующих блока. Прежде всего – это выполнение базовой задачи оборудования лунного поселения и проведения СМР по созданию его инфраструктуры.

Другой частью работ является подготовка и решение целевых задач, а также проведение на Луне фундаментальных и научно-прикладных исследований и экспериментов (НПИиЭ) (рис. 5 а, б).

Представленный выше перечень, определяет этап решения крупных фундаментальных научных задач. Ему должен предшествовать период проведения более простых и менее затратных научных исследований и экспериментов. Они также, в подавляющем большинстве случаев, объективно, будут связаны с монтажом специального оборудования, проведением геологических и сейсмографических работ, размещением сети специальных датчиков, фиксации (высокоточной координатной привязки) мест проведения измерений и т. п., на базе заранее подготовленной геоподосновы.

Отдельным важным условием успешности проведения космических экспериментов будет являться их повторимость в заданных условиях, а также возможность корректной обработки больших объёмов экспериментальных данных (например, массивов точек лазерных отражений (ТЛО) лидара), связанных с топологией поверхности Луны и (или) её недр.

В перечне научных задач на данном этапе целесообразно рассматривать следующие виды НПИиЭ [7, 20, 21, 39, 59]:

1. Оценка содержания воды в приповерхностном слое лунного грунта;
2. Геохимическая классификация лунных пород;
3. Разделение пород на «морские» и «не морские»;
4. Установление содержания элементов, привнесённых солнечным ветром;
5. Изучение поверхностной гидратации реголита;
6. Регистрация пылевых частиц и определение параметров плазмы над поверхностью Луны;
7. Изучение динамики ансамблей активных монодисперсных и полидисперсных макрочастиц в плазме и электрических полях различной конфигурации;
8. Измерение напряжённости электромагнитных, электростатических и магнитных полей;
9. Регистрация рентгеновского излучения от космических источников;
10. Высокоточный многоцветный фотометрический обзор звёзд всего лунного неба высокой и промежуточной яркости;

11. Изучение потоков быстрых и тепловых нейтронов, поиск средств противорадиационной защиты;
12. Измерение температурных режимов и скорости массопереноса при испарении льда из подвижного слоя лунного реголита;
13. Исследование и отработка технологических процессов переработки лунного реголита методом твердофазного электролитического восстановления кислорода и металлов из оксидов;
14. Определение материаловедческих и технологических факторов создания элементов лунной инфраструктуры из композиционных материалов на основе реголита в условиях пониженной гравитации;
15. Отработка технологии создания и эксплуатации автономных бортовых источников электропитания на различной технологической базе;
16. Исследования эффекта электрорегулируемой «сухой» адгезии эластичных полимеров и армированных композиционных материалов;
17. Отработка технологии автоматического мониторинга химического состава закрытой воздушной среды с использованием алгоритмов искусственного интеллекта в части распознавания газов;
18. Проведение дистанционных измерений температурных полей модулей лунной базы в реальных условиях эксплуатации, в том числе, с целью выявления проблемных зон утечки тепла, перегрева, качества теплоизоляции;
19. Проведение регулярных дистанционных высокоточных измерений геометрических параметров крупногабаритных космических конструкций и объектов;
20. Отработка технологии создания многослойной трансформируемой гермооболочки (МТГО);
21. Проведение исследований и отработки технологических процессов гидротермальной карбонизации органических отходов с целью их преобразования в топливо (углерод) или газ;
22. Отработка технологий, материалов и инструментария для проведения монтажных, ремонтно-профилактических и регламентных работ в интерьерах модулей лунной базы;
23. Отработка технологии локального контроля состояния внутренней и внешней

поверхностей модулей лунной базы с помощью микроробототехнического инспекционного комплекса и реактивных БПЛА;

24. Обнаружение и удаление загрязнений различного происхождения методом лазерной абляции;

25. Отработка режимов и технологии плазменной очистки поверхностей и объёмов от мелкодисперсной пыли и др.

Как показано ранее, общий алгоритм проведения любых СМР, на Земле или в условиях иных планет, должен включать в себя следующие базовые блоки (виды работ), подлежащие обязательному исполнению (рис. 6).

Рассмотрим некоторые из указанных этапов, представленных на рисунке, для подтверждения их особого статуса в контексте понимания термина строительство (особенно в условиях проведения напланетной деятельности, характеризуемой малой изученностью объекта проектирования и проведения СМР, экстремальными условиями работ, удалением от Земли, а также особым влиянием человеческого фактора).

Основные виды инженерных изысканий (для земных условий, на основании российских нормативных актов) включают в себя [22, 23]:

- Инженерно-геодезические;
- Инженерно-геологические;
- Инженерные гидрометеорологические;
- Инженерные экологические.

Дополнительно, в зависимости от поставленных целей, выделяют несколько специальных направлений инженерных изысканий: геофизические, геотехнические, кадастровые и др.

Характеристики наиболее вероятных к проведению на Луне, инженерно-геодезических и инженерно-геологических изысканий, в существующих в настоящее время формулировках, учитывая «пионерский» этап их выполнения на необорудованной лунной местности при отсутствии подготовленной селеноподосновы, представлены далее.

Инженерно-геодезические изыскания - комплекс исследований и сопутствующих мероприятий, направленных на сбор, обработку и анализ сведений о рельефе местности, а также объектах, расположенных на определённой территории. Такие изыскания проводятся

с целью оценки и обоснования технической возможности и финансовой целесообразности, как проектирования, так и возведения сооружений и зданий.



Рис. 6. Типовые элементы организации строительно-монтажных работ

В процессе инженерно-геодезических изысканий специалистами выполняются следующие мероприятия:

- подготовка (создание) планово-высотных съёмочных геодезических сетей;
- топографическая съёмка на участке строительства;
- формирование топографических планов (ТП);
- подготовка цифровых моделей местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР);
- трассирование линейных сооружений и закрепление трассы и её сооружений на местности;
- геодезические работы для проектирования зданий и сооружений, включая съёмки

наземных и подземных объектов;

- геодезическая привязка выработок, точек геофизической разведки и иных артефактов на поверхности и иные виды работ.

Инженерно-геологические изыскания включают:

- сбор и обработку геологических материалов;
- дешифрирование аэрокосмических материалов и фотоснимков;
- инженерно-геологическую рекогносцировку территории;
- инженерно-геологическую съёмку;
- лабораторные исследования физико-механических и химических свойств грунтов;
- инженерно-геофизические исследования;
- сейсмологические и сейсмотектонические исследования и т. д.

Проведение инженерно-геодезических, а также инженерно-геологических изысканий – обязательная и необходимая стадия выполнения любых строительных работ. Проект строительства и прогноз потенциальных рисков функционирования объектов базируются именно на полученных данных инженерных изысканий.

Цена ошибки при проведении инженерных изысканий очень высока. Неполные и недостоверные результаты исследований оказывают негативное влияние на принятие проектных и управленческих решений. При проведении инженерных изысканий важно использование современных измерительных приборов и методов, буровой техники, специального программного обеспечения и высокопроизводительных компьютерных систем обработки материалов изысканий. Особое значение это будет иметь для Луны, где технологии инженерных изысканий не отработаны, условия деятельности существенно отличаются от земных, а режимы функционирования будущих космических баз позволяют классифицировать их, в соответствии с п. 5, ст. 48.1. Градостроительного кодекса РФ как «особо опасные и технически сложные объекты» [24, 25].

Как показывает практика, неучёт данных факторов объективно приводит к последствиям, каждое из которых, а тем более их совместное наступление, является критическим и труднопреодолимым даже в земных условиях. Это, прежде всего:

- существенные переделки и простои на этапах проектирования, строительства и монтажных работ;
- срывы сроков сдачи космического объекта в эксплуатацию;

- значительное удорожание (более чем на $\frac{1}{2}$) СМР;
- возникновение техногенных аварий и катастроф.

Анализ основных нарушений технологии проведения СМР, связанных с недостатками проведения инженерных изысканий при организации строительства на Земле [26, 27, 28, 32], позволяет определить состав проблем, с которыми могут столкнуться проектировщики и строители будущих напланетных баз (Таблица 2).

Рассмотрим основные положения современной российской нормативно-законодательной базы по обеспечению геодезической точности координатного обеспечения строительно-монтажных работ, вообще, и проводимых инженерных изысканий, в частности. Соблюдение указанных в НТД параметров является необходимой предпосылкой качественного и безопасного проведения СМР и в земной, и в космической обстановке. Их напланетная реализация, по-видимому, позволит упростить ряд требований, связанных с меньшей гравитацией, однако ужесточит критерии исполнения отдельных работ, зависящих от иных внешних условий напланетной деятельности (суточные перепады температуры на Луне, вакуум, свето-теневая обстановка, адгезия лунной пыли, повышенная радиация, гипомagnetизм и т. д.).

Табл. 2. Некоторые возможные нарушения проведения СМР на Луне

№ пп	Возможные характерные виды нарушений (отклонений от проекта) при проведении строительно-монтажных работ на Луне
1	Нарушения заданной геометрии при производстве работ с лунным грунтом
2	Смещение от проектного положения элемента или конструкции в целом
3	Неудачное решение узлов конструкции, неучёт сейсмических или температурных воздействий
4	Образование недопустимых деформаций грунта основания, вызывающих повреждение зданий, появление значительных кренов, сдвигов, трещин и пр. (при осуществлении строительства объектов базы из материалов, полученных на основе лунного реголита)
5	Недостаточная несущая способность конструкций и строительного объекта в целом, развитие деформаций и смещений
6	Необеспечение эксплуатационных качеств сооружения вследствие недопустимых прогибов, трещин, колебаний, повышенной радиационной и тепловой проводимости и пр.
7	Необеспечение долговечности конструкции вследствие внутренней коррозии материалов, низкой температурной стойкости и т. д.
8	Наличие трещин всех видов, направлений и размеров в сварных или монтажных швах
9	Ослабление болтовых или заклёпочных соединений
10	Принятие не рациональных конструктивных решений
11	Коррозия материалов покрытия
12	Повреждение действующих инженерных сетей или элементов действующей инфраструктуры
13	Невозможность правильного подключения к развёрнутым строительным инженерным сетям
14	Проблемы со стыковкой к соседним участкам - как в координатах, так и в высотных отметках, нарушение проектной геометрии размещения распределённых инфраструктурных объектов, элементов лунной базы, научной аппаратуры, СПСП, хранилищ вредных отходов и т. д.

Данные требования зафиксированы в сводах правил: «СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ», «СП 126.13330.2017. Геодезические работы в строительстве»; Приказе Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии № П/0393 от 20.10.2020 г. «Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершённого строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения, помещения, машино-места» и в других нормативных документах [29, 30, 31].

Данными НТД определяются и формализуются требования к применяемым масштабам картографических материалов, устанавливаются нормативы (средние квадратические погрешности - СКП) расчёта параметров положения характерной точки при любых видах строительства для различных методов определения координат, а именно:

- 1) геодезического метода (полигонометрия, прямые, обратные или комбинированные засечки и иные геодезические методы);
- 2) метода спутниковых геодезических измерений (определений);
- 3) комбинированного метода (сочетание геодезического метода и метода спутниковых геодезических измерений (определений);
- 4) фотограмметрического метода;
- 5) картометрического метода;
- 6) аналитического метода.

В подавляющем большинстве случаев, алгоритм определения координат произвольной точки базируется на проведении относительных инструментальных измерений ее положения относительно ближайшей точки подготовленного съёмочного обоснования государственной геодезической сети (ГГС) или геодезической сети специального назначения (местной геодезической сети) и СКП при этом составляет:

$$M_i = \sqrt{m_0^2 + m_i^2},$$

где: M_i - средняя квадратическая погрешность определения координат характерной i -точки относительно ближайшего пункта ГГС или геодезической сети специального назначения; m_0 - средняя квадратическая погрешность определения координат точки

съёмочного обоснования относительно ближайшего пункта; m_i - средняя квадратическая погрешность измерения координат характерной i -точки относительно точки съёмочного обоснования, с которой производилось ее определение.

Максимальные СКП для различных условий строительства и методов создания геоподосновы, в условиях проведения геодезической съёмки объектов на ограниченной территории представлены на рис. 7 и 8, а вид типового градостроительного плана (топоплана М 1:500) показан на рис. 9.

Характеристика объектов строительства	Величины среднеквадратических погрешностей построения разбивочной основы строительства			Предельная погрешность взаимного планового положения смежных пунктов разбивочной основы X,Y, мм	Предельная погрешность взаимного высотного положения смежных пунктов разбивочной основы, мм	Плотность пунктов разбивочной основы на застроенной (незастроенной) территории
	Угловые измерения, с	Линейные измерения	Определение превышения на 1 км хода или отметок смежных реперов на застроенной (незастроенной) территории, мм			
1 Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью более 1 км ² ; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки более 100 тыс. м ²	3	1	3 (10)	50	10	16 (4)
		25000				
2 Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью менее 1 км ² ; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки от 10 до 100 тыс. м ²	5	1	6	30	5	9
		10000				
3 Отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки менее 10 тыс. м ² ; сети инженерно-технического обеспечения в пределах застраиваемых территорий	10	1	10	20	5	4 (16); для сетей инженерно-технического обеспечения пункты располагать не реже чем через 100 м, параллельно осям трасс и в точках резкого излома трасс
		5000				
4 Сети инженерно-технического обеспечения вне застраиваемых территорий; земляные сооружения, в том числе вертикальная планировка	30	1	5	50	10	Для сетей инженерно-технического обеспечения — то же, что и в пункте 3; для земляных сооружений и вертикальной планировки — согласно ППГР и картограмме земляных работ
		2000				

Рис. 7. Требования к созданию разбивочной основы строительной площадки [30]

Анализ представленных материалов позволяет говорить о том, что при высокой абсолютной точности современных геодезических измерительных приборов (m_i), основной вклад в суммарную ошибку вносят погрешности исходных геодезических данных (m_0), к которым относятся: 1) *астрономо-геодезические* - координаты и высоты пунктов опорных сетей; азимуты направлений; 2) *гравиметрические* - высокоточная гравиметрическая съёмка площадок; величины уклонений отвесных линий; 3) *топографические и фотограмметрические* - карты различных масштабов; фотокарты и фотопланы, ландшафтные панорамы; 4) *инженерно-геодезические* — крупномасштабные планы площадок; продольные профили трасс и рек; геодезическая привязка геологических выработок; результаты натурных наблюдений за микросмещениями пород и деформациями

сооружений и пр.

Основные требования к точности определения положения
пунктов в плановой опорной геодезической сети

Вид сети	СКП определения координат относительно исходных пунктов, мм, не более	СКП взаимного положения смежных пунктов в плане, мм, не более	СКП взаимного положения смежных пунктов по высоте, мм, не более
1 КГС и (или) сеть постоянно действующих базовых (референчных) станций ГНСС	20	15	20
2 СГСС; сеть постоянно действующих базовых (референчных) станций ГНСС	20	20	25
3 Полигонометрия, триангуляция, трилатерация 4-го класса; сети, создаваемые спутниковыми определениями	20	25	-
4 Полигонометрия, триангуляция, трилатерация 1-го разряда, сети сгущения, создаваемые спутниковыми определениями	50	30	-
5 Полигонометрия, триангуляция, трилатерация 2-го разряда, сети сгущения, создаваемые спутниковыми определениями	50	40	-
Примечания 1 При применении спутниковых технологий, СКП определения координат пунктов ОГС относительно исходных пунктов применяют, когда исходными являются пункты высокоточной геодезической сети или спутниковой геодезической сети 1-го класса, если иное не предусмотрено заданием или программой. 2 В случае использования в качестве исходных пунктов, точность планового положения которых ниже точности измерений, выполняемых современными геодезическими приборами, при уравнивании рекомендуется применять обоснованные в программе методы, позволяющие предотвратить снижение точности взаимного положения пунктов создаваемой ОГС (или ГССН) вследствие влияния недостаточной точности исходной геодезической сети.			

Рис. 8. Точностные требования к пунктам опорной сети [30]

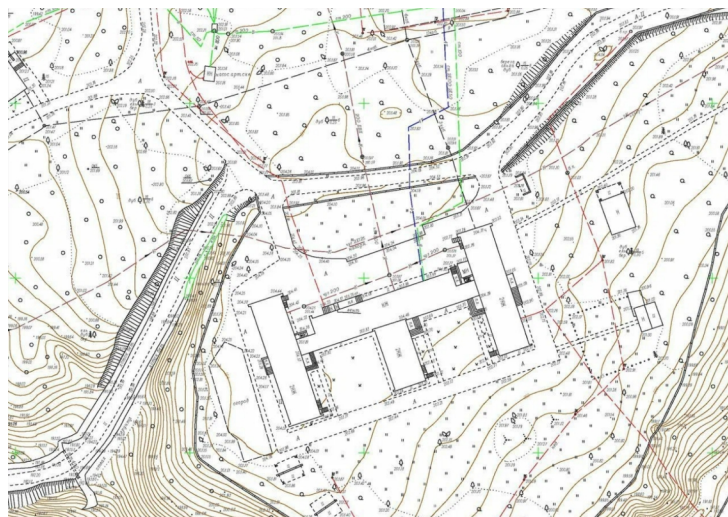


Рис. 9. Фрагмент топографического плана М 1:500

N п/п	Категория земель и разрешенное использование земельных участков	Средняя квадратическая погрешность определения координат (местоположения) характерных точек, м	Размер проекции пикселя на местности для аэрофотоснимко в и космических снимков, см
1	Земельные участки, отнесенные к землям населенных пунктов	0,10	5
4	Земельные участки, отнесенные к землям промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения, информатики, землям для обеспечения космической деятельности, землям обороны, безопасности и землям иного специального назначения	0,50	9

Рис. 10. Требования по точности позиционирования границ территорий [31]

Таким образом, главным нормативным ориентиром по пространственной точности проведения строительных работ на Луне, для нас являются величины *первых дециметров*. Следует понимать, что эти требования относятся к координатной поддержке любых видов напланетных работ на Луне: обозначению и разбивке территории лунной базы; планированию её элементов, включая маршруты перемещения автоматизированных напланетных роботизированных и транспортных систем; размещению и монтажу жилых и специальных модулей; развёртыванию и интеграции оборудования научного полигона, прокладке инженерных сетей и т. д.

Другой важный тезис, который следует зафиксировать – это видение важности и необходимости развёртывания, а также оборудования на Луне собственной геодезической (селенодезической) сети, аналогичной любой из применяемых в настоящее время в земной геодезии и разработка корректных алгоритмов или ключей перехода между используемыми системами координат [32, 33, 34, 35].

Применимость методов и технологий «традиционной» навигации для Луны

Проанализируем, какие возможности в контексте обеспечения напланетной деятельности на Луне, предлагают нам конструкторы современных космических систем и

авторы большого числа лунных и марсианских проектов. Таковых достаточно много и предстоит выполнить некоторую классификацию предлагаемых способов навигации на Луне с целью проведения их всесторонней оценки в интересах более полного раскрытия темы, рассматриваемой в данной статье:

- А) Использование радиотехнических угломерно-дальномерных систем;
- Б) Применение астрономических методов и средств навигации;
- В) Реализация методов создания глобальных систем лунной навигации на основе использования специальных орбитальных КА, среди которых:
 - создание селеноцентрической системы на основе квантово-оптических средств наблюдений и данных космических миссий;
 - создание глобальной системы связи и навигации на Луне - аналога GPS;
 - построение оптической лунной навигационной системы (НС) на базе космических аппаратов АО «НПО Лавочкина» и др.

Радиотехнические угломерные, угломерно-дальномерные и разностно-дальномерные навигационные системы (РНС) получили широкое распространение в сфере авиационного и морского транспорта гражданского и военного назначения во второй половине XX века. К ним относятся автоматические радиопеленгаторы, радиокомпасы, радиотехнические системы ближней и дальней навигации. В эксплуатации насчитывалось более ста типов указанных РНС. Следует назвать наиболее известные системы мирового уровня, среди которых LORAN-C, OMEGA, VORTAC, TACAN, РСБН-6, РСДН-3, РСДН-10 и др. Существуют различные классификации их характеристик и вариантов применения, однако основным следует считать обеспечение точного и безопасного маршрутного перемещения морских и воздушных судов, включая формирование специального предпосадочного маневра летательных аппаратов [36, 37].

Максимально достижимая точность маршрутного позиционирования на базе РНС достаточна только для грубого определения местоположения абонента и составляет *от сотни до тысячи* метров. Она зависит от поколения используемой аппаратуры, её конкретного типа, а также условий применения. С целью повышения навигационной точности в современных цифровых НС используют комплексирование радиотехнических, инерциальных и спутниковых данных [37, 38].

Ранее, для обеспечения лунной навигации, считалось возможным и целесообразным «...использовать наземные РТС в радиоинтерферометрическом режиме определения

селенографических координат объектов на поверхности Луны», а также «применять радиосистемы, работающие в УКВ диапазоне, для измерения параметров дальности и азимута объекта» [39].

Как известно, в космонавтике широко распространено применение астрономических методов и средств навигации. С момента начала освоения космического пространства дорогу в жизнь получило несколько поколений астронавигаторов.

Астрономическая навигация - это практика определения местоположения с использованием звёзд и других небесных тел, которая позволяет оператору точно определять своё текущее фактическое положение в космосе или на поверхности Земли.

Астрономическая навигация достигает своей цели за счёт использования угловых измерений между небесными телами и видимым горизонтом для определения своего положения на Земле (на суше, в воздухе или на море). Этот метод может использоваться и на других планетных телах для определения положения на их поверхности, используя их местный горизонт и подходящие небесные светила.

Уже со второй половины прошлого столетия стали появляться передовые электронные, а затем и компьютерные системы, позволяющие навигаторам осуществлять автоматическую пеленгацию небесных явлений (светил). Эти системы использовались как на кораблях, так и на самолётах и были относительно высокоточными. Они могли фиксировать положение до одиннадцати характерных (опорных) звёзд и определять местоположение воздушного судна с погрешностью *около 100 м*. Высокоскоростной стратосферный разведчик ВВС США SR-71 был одним из первых примеров самолёта, который использовал интеграцию автоматизированной небесной и инерциальной навигации. Межконтинентальные баллистические ракеты используют астронавигацию для корректировки своего гиростабилизированного курса во время полета за пределами атмосферы Земли.

Навигация и хронометраж на основе пеленгации рентгеновских излучений - экспериментальный метод навигации в космосе, при котором периодические рентгеновские сигналы, испускаемые пульсарами, используются для определения местоположения космического корабля в глубоком космосе. Транспортное средство, применяющее эту технологию, будет сравнивать полученные рентгеновские сигналы с базой данных известных частот и местоположений пульсаров. Преимущество использования приёмников рентгеновских сигналов перед радиоволновыми заключается в том, что габариты рентгеновских телескопов меньше и они легче. Однако средняя точность позиционирования

объектов при их использовании составляет *несколько километров*.

Современные приборы - астронавигаторы используются на борту РС МКС (визир пилота ВП-2 и панкратический переносной астровизир «ПУМА»). На уровне научных исследований их перспективное применение планируется во всех этапах проведения космических полётов, в том числе и в ходе реализации пилотируемой лунной программы (рис. 11). В то же время следует учитывать, что предельная точность позиционирования с использованием самых совершенных астронавигаторов составляет *около 50 м* и они объективно не могут быть востребованы при проведении строительных работ на Луне.

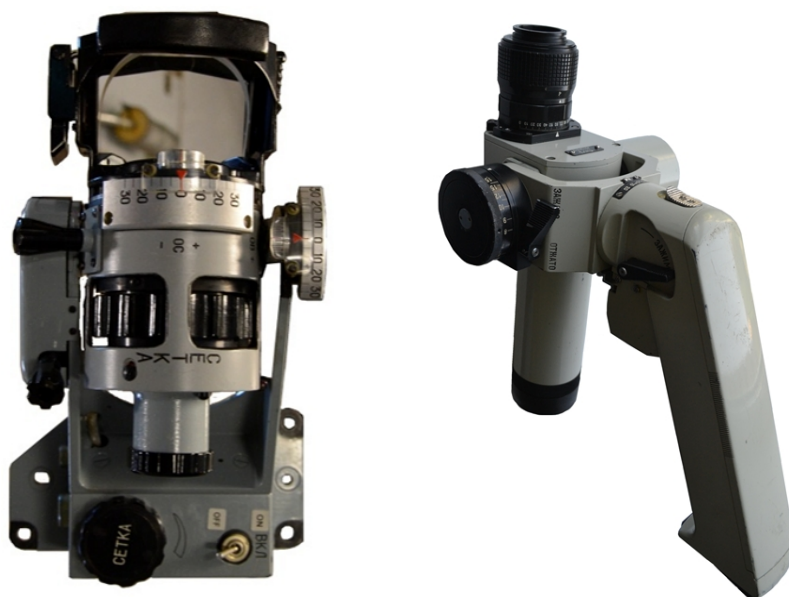


Рис. 11. Внешний вид приборов-астронавигаторов ВП-2 и «ПУМА»

Поскольку, применение представленных выше традиционных радиотехнических и астрономических способов навигации не обеспечивает потребности координатной поддержки напланетного строительства, современные исследователи всё чаще рассматривают возможности развёртывания на лунных орбитах глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Учёными и конструкторами предлагается большое количество вариантов применения орбитальных спутниковых систем в интересах обеспечения навигации на Луне. Проекты отличаются методами определения положения объектов на поверхности спутника, количеством и характеристиками КА, степенью поддержки функционирования группировки со стороны наземных и иных систем обеспечения, а также стоимостью и потенциальными сроками внедрения ГНСС, что будет рассмотрено в последующих материалах по данной

тематике.

Любое строительство на Луне – процесс очень сложный и многоэтапный. Как и аналогичная деятельность в земных условиях, она потребует создания и развития высокоточной геоподосновы, обеспечивающей на различных стадиях возведения напланетных объектов их правильного положения в пространстве и выполнения функционального назначения.

Проведение строительно-монтажных работ космонавтами в ходе внекорабельной деятельности (ВКД), а тем более осуществление указанной миссии с использованием автоматических РТС, должно быть обеспечено их координатной поддержкой с точностью, соответствующей первым дециметрам. Современным методам, позволяющим решить такую задачу в условиях Луны, будет посвящена следующая публикация по указанной тематике.

Как показано выше, установленные требования к строительным системам координат и точности координатной поддержки строительно-монтажных работ (СМР) на Луне могут быть достигнуты путём реализации специальных видов геодезического (селенодезического) обеспечения.

Применение представленных ранее традиционных радиотехнических и астрономических способов навигации не обеспечивает потребности координатной поддержки напланетного строительства. В связи с этим, современные исследователи всё чаще рассматривают возможности развёртывания на лунных орбитах *глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС)*. Предлагаемые проекты отличаются методами определения положения объектов на поверхности Луны, количеством и характеристиками КА, степенью поддержки функционирования группировки со стороны наземных и иных систем обеспечения, а также стоимостью и потенциальными сроками внедрения ГНСС и т.д.

а) Создание селеноцентрической системы на основе квантово-оптических средств наблюдений и данных космических миссий.

Разработка является детищем Казанского федерального университета. Под словосочетанием «селеноцентрическая навигационная опорная сеть» в проекте понимается «следующее: создание матрицы опорных объектов на лунной поверхности, к которым можно осуществить привязку с борта космического аппарата, и, как следствие, определить заданную поверхность отсчёта по множеству наблюдаемых данных» [40, 41].

В качестве совокупности таких опорных объектов предлагаются светодиодные лазерные маяки (СЛМ), устанавливаемые на поверхности Луны и представляющие собой

приборы для генерирования светового потока с заданной плотностью, длиной волны и требуемой мощностью. Конструктивно в систему закладывается возможность наблюдения СЛМ с Земли. В случае высокоточного измерения угла (направления на распределённые по поверхности Луны СЛМ) спутниковым угломерным устройством, возможно достижение точности миллиметрового и субмиллиметрового позиционирования маяков. Пространственно-временные характеристики СЛМ могут изменяться по команде системы управления. В настоящее время на Луне можно разместить лазерные маяки только с помощью мягкой посадки научного оборудования. Вместе с тем разрабатываются пенетаторы (зонды), которые можно сбросить с окололунного КА на любую точку поверхности Луны с целью их последующей селенодезической привязки и использования.

Результатом работ станет создание сводного опорного селеноцентрического реестра лунных объектов в небесной системе координат и построение координатной динамической сети на Луне, позволяющей решать задачи пассивной оптической пеленгации наблюдаемого множества уникальных постоянно действующих маяков, привязанных к конкретным артефактам на лунной поверхности.

Данная технология может быть наиболее полезна для корректировки положения КА, находящихся на орбите Луны и наблюдающих одновременно большой сегмент сети СЛМ. Однако при проведении строительных работ на поверхности спутника она напрямую не используется, а абсолютная точность позиционирования объектов в пассивной оптической сети составляет *первые десятки метров*. В качестве недостатков проекта следует указать на: необходимость предварительного высокоточного картографирования заданных районов размещения СЛМ; использование большого числа космических миссий для развёртывания и поддержания в эксплуатационном состоянии указанной сети; решение проблемы «обратной стороны Луны»; применение мощного ресурса наземных вычислительных устройств и т. д.

б) Построение оптической лунной навигационной системы на базе группы космических аппаратов (проект института астрономии РАН и АО «НПО Лавочкина»).

Указанное предложение имеет аналогии с представленным выше. Оно состоит в реализации идеи пеленгации на поверхности Луны нескольких специальных лазерных маяков, размещаемых на борту напланетной космической станции (класса Луна-25), с борта специальных орбитальных КА – искусственных спутников Луны (ИСЛ), непрерывно связанных с Землёй (рис. 12).

Для решения проблемы создания данной лунной навигационной системы необходимо

последовательно решить следующие задачи [42, 43, 44]:

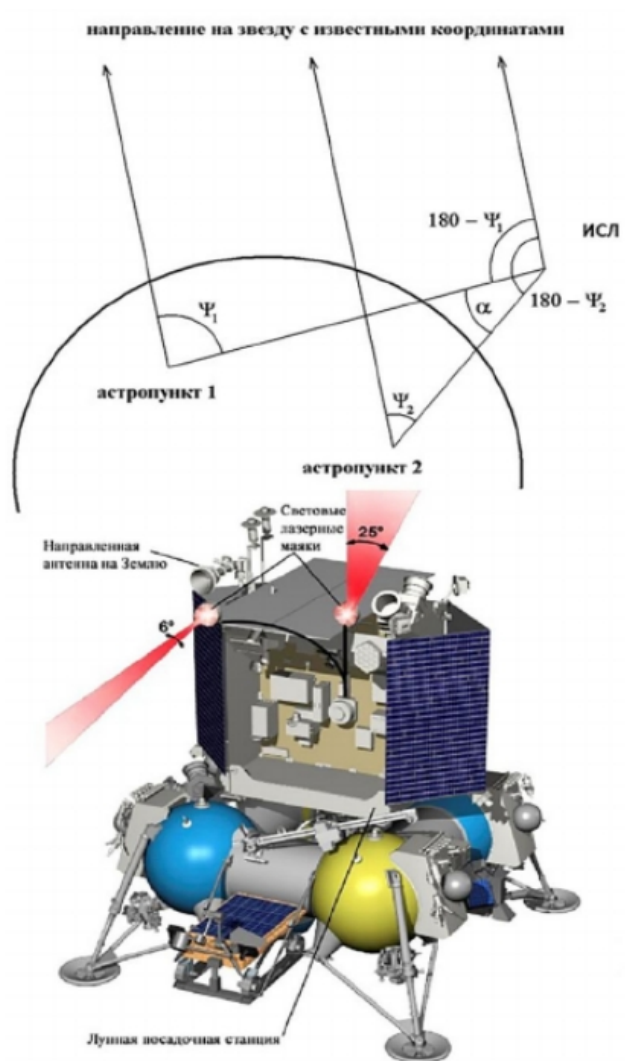


Рис. 12. Схема измерений световых (лазерных) маяков с борта ИСЛ [43]

- развёртывание высокоточной опорной (селенодезической) системы координат, путём установки на поверхности Луны опорных световых лазерных маяков и систем наблюдения на платформе космических аппаратов;
- использование полярного орбитального лунного КА№1 с оптико-электронной системой наблюдения, позволяющей фиксировать, как объекты навигации, так и опорные лазерные маяки;
- развитие такой системы на заключительном этапе её реализации методом размещения двух космических аппаратов (КА№2 и КА№3) с оптическими приборами в точках Лагранжа L1 и L2, что позволит обеспечить глобальную координатно-временную

привязку объектов на видимой и обратной стороне Луны, а также передачу навигационной информации потребителям (рис. 13 а, б). Расчётная точность позиционирования с использованием указанной ГНСС, по заявлениям разработчиков, может составить от 10 до 30 метров.

- Создание глобальной системы связи и навигации на Луне.

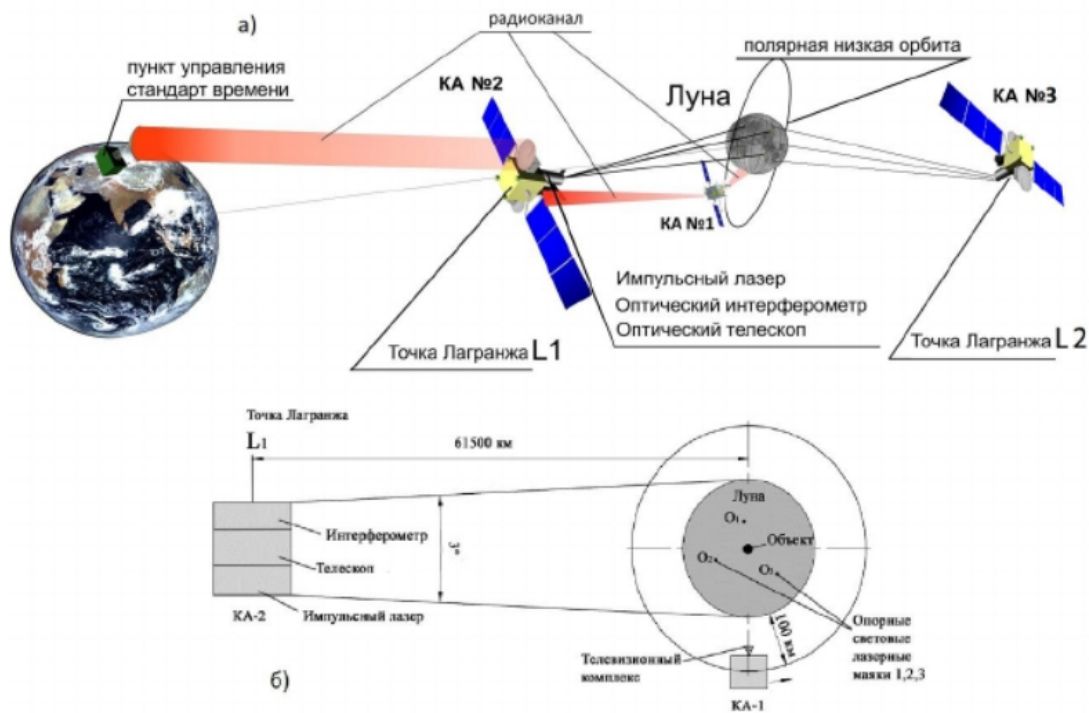


Рис. 13. Схема построения глобальной оптической лунной навигационной системы:
а) – модель размещения космических аппаратов; б) – схема наблюдения.

Наиболее проработанной и обсуждаемой является тема развёртывания на орбитах Луны ГНСС, аналогичной глобальным спутниковым системам класса GPS/ГЛОНАСС/Galileo/Beidou [45, 46, 47].

По мнению авторов различных национальных вариантов реализации данной модели, проведение различных работ на поверхности Луны должно опираться исключительно на высокоточную систему спутникового позиционирования находящихся на Луне объектов, особенно луноходов, РТС и пилотируемых аппаратов (рис. 14).

Системы глобальной навигации на Земле успешно функционируют уже много лет, позволяя пользователям в любой момент времени автономно определять своё положение с точностью около 5 метров (рис. 4).

Вполне естественным было бы повторить отработанную систему глобального

позиционирования и на Луне. Однако, это труднореализуемо в ближайшей исторической перспективе по нескольким причинам.

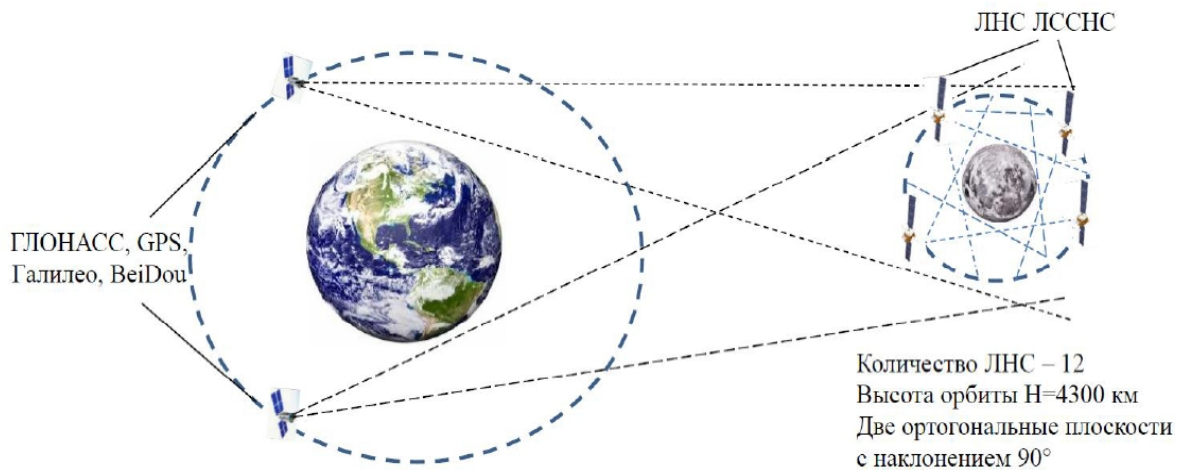


Рис. 14. Российские предложения по реализации специальной системы лунной навигации и связи (ЛССНС) на базе 12 орбитальных навигационных спутников (ЛНС)

Во-первых, существующие системы глобального позиционирования опираются на работу многочисленной группировки спутников. Технология реализации земных ГНСС требует, что бы в любой момент времени каждый пользователь системы, мог уверенно получать сигналы, как минимум, от четырёх навигационных КА. По принимаемому со спутника сигналу наземный приёмник абонента вычисляет дальность до каждого спутника и, по известному пространственному положению спутников, определяет своё пространственное положение.

В том случае, когда система глобального позиционирования рассчитана на массового потребителя, её существование экономически оправдано малой стоимостью измерения навигационных параметров одним приёмником. Она получается существенно ниже стоимости (при соизмеримой точности) определения тех же координат другими способами.

На Луне потенциальное число позиционируемых напланетных объектов в ближайшие годы не превысит нескольких единиц или десятков. В этом случае стоимость проведения координатных измерений одного объекта возрастает до недопустимой величины.

Во-вторых, наземные и лунные системы глобального позиционирования не могут существовать без наземной координатной поддержки. Орбита каждого навигационного спутника должна быть точно известна, а всякие изменения её параметров – отслежены и измерены. На Земле существует несколько сотен станций наземной поддержки систем

глобального позиционирования, тогда как создание их на Луне, и в обозримом будущем, не предвидится.

В-третьих, космическая техника рассчитана на сравнительно недолгий срок безотказной работы оборудования – около 10 лет. А это значит, что группировка спутников системы глобального позиционирования должна постоянно обновляться, обслуживаться и резервироваться. Получается парадоксальное положение, когда для координатного обеспечения нескольких аппаратов на поверхности Луны требуется многочисленная группировка ИСЛ навигационного назначения. В работе [48] детально анализируется необходимое оптимальное количество КА для создания лунной ГНСС и показано, что для этого необходимо до 18 лунных навигационных спутников.

Особое внимание следует обратить на параметры необходимой точности лунных НС. Указанные разработчиками навигационных систем, их точностные характеристики находятся в диапазоне *от 5 до 10 метров* (рис. 15).



Рис. 15. Возможности спутниковых навигационных систем в условиях Земли

Получение характеристик, обеспечивающих требования строительных нормативов, указанных ранее, и составляющих величины первых дециметров, возможно только при выполнении ряда дополнительных условий (расчёта точных эфемерид, применения режимов PPP (Precise Point Positioning), использования методов определения относительных координат и пр.). Эти условия (работы) трудно автоматизируемы, должны исполняться

профессиональными геодезистами высочайшей квалификации и достижимы при проведении специальной подготовки объектов строительства, использовании соответствующей аппаратуры или пролонгированного проведения заданных циклов геодезических измерений.

Таким образом, полноценная реализация земной модели высокоточного навигационного обеспечения пилотирования летательных аппаратов и напланетных транспортных средств, а также координатной поддержки любых видов строительства (рис. 16), даже в случае успешного создания лунной группировки ГНСС, на Луне – практически не достижима.



Рис. 16. Информационная модель реализации спутниковых навигационных систем

Как сказано ранее, одной из сложнейших проблем, подлежащих разрешению при организации любой напланетной деятельности, является предварительное создание и оборудование системы координат (СК) для производственных и строительных территорий, а также разработка её математической основы.

Что такое система координат в приложении к рассматриваемой области деятельности человека на Луне или иных планетах? Это, прежде всего, модель, позволяющая связать между собой на плоскости или в пространстве элементы разворачиваемой космической инфраструктуры в привязке к конкретному участку местности и характерным объектам на

ней (установлению соответствий различного рода). Цели указанной деятельности – формализованное (единое, координатное, универсальное) знание местоположения каждого из пользователей сети и управление их движением в интересах решения тех или иных задач строительства космических баз, освоения поверхности планеты или ее недр, решение задач безопасности и пр. [49, 50].

Другой важной составляющей навигационной компоненты является программно-аппаратный комплекс, решающий задачи координатного обеспечения на приборном (техническом) уровне и обеспечивающий соответствующий интерфейс для космонавтов.

Не в пользу реализации концепции *глобальной навигации* для Луны говорит необходимость изготовления значительного числа специальных космических аппаратов (группировки), их запуск на орбиту естественного спутника Земли, развёртывание и синхронизация местоположения КА, а также проведение специальных навигационных расчётов и предоставление навигационной информации потребителям на Луне с использованием удалённой сети обеспечивающих наземных вычислительных пунктов. Однако, при этом, даже теоретически невозможно обеспечить абсолютную погрешность получения пространственных координат меньше десяти метров.

Как показано выше, анализ характеристик ряда предлагаемых аналогичных глобальных спутниковых систем навигации и связи, включая оптические, лазерные и иные решения, чьи алгоритмы, как правило, синхронизированы с наземной поддерживающей компонентой, иллюстрирует неудовлетворительные для решения напланетных задач освоения и строительства для Луны пространственные параметры точности и надёжности представляемой навигационной информации.

Отдельной проблемой указанных ГНСС является временной диапазон их возможного развёртывания на орбитах Луны, общая высокая стоимость любой глобальной навигационной системы, а также её недостаточная надёжность в целом, что определяется большим числом функциональных компонентов и потребностью регулярной дистанционной поддержки с Земли. Таким образом, речь о *глобальном позиционировании* на Луне в контексте его практического использования, может вестись только в рамках реализации будущих перспективных программ промышленного освоения этой планеты.

Местные системы координат и правила их установления для Луны

Альтернативой глобальной навигации, ставшей доминантой современного века для всего земного шара, является теория и практика применения локальных или местных систем координат (МСК), обеспечивающих решение задач координатной поддержки пользователей на ограниченной территории в интересах решения большого круга различных навигационных задач.

Под МСК понимается условная система координат, устанавливаемая в отношении ограниченной территории, начало отсчёта координат и ориентировка осей координат которой смещены по отношению к началу отсчёта координат и ориентировке осей координат единой государственной системы координат, используемой при осуществлении геодезических и картографических работ.

Местные системы координат устанавливаются для проведения геодезических и топографических работ при инженерных изысканиях, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, межевании земель, ведении кадастров и осуществлении иных специальных работ [51]. Общее количество местных систем координат, используемых на территории Российской Федерации, оценивается в 30 тысяч [52].

МСК населённых пунктов и локальных территорий в целом являются препятствием для построения единого высокоточного гомогенного (однородного по точности) координатного пространства территорий больших стран, материков и планеты в целом. Однако данное ограничение не является существенным в ситуации освоения локальных территорий Луны, особенно на начальных этапах реализации лунной программы. В то же время МСК являются полноценным инструментом для построения единого координатного пространства локальных и не связанных территорий при условии, что они созданы и оборудованы на основе требований построения соответствующих государственных систем координат (ГСК), а также существуют современные автоматизированные средства координатного перехода между соседними местными системами координат или между МСК и ГСК.

Таким образом, на начальном этапе освоения Луны местная система координат может быть эффективно использована при решении нескольких основных задач – навигационного оборудования посадочной площадки для обеспечения лунных посадочных модулей в выбранном месте лунной поверхности, а также обеспечения высокоточной координатной

поддержки топографических, строительных и инженерно-изыскательских работ при возведении жилой и производственной инфраструктуры первой лунной колонии. При этом, предлагаемый далее способ технической реализации лунной вычислительной сети, базирующейся на МСК, обеспечит требуемую сантиметровую внутреннюю сходимость пространственных данных для всех оборудуемых территорий и может быть технически воплощён на поверхности Луны уже в ходе первых пилотируемых миссий. Данный метод основан на применении лидаров сканирующего типа, аналогичных оптико-электронным системам наземного лазерного сканирования (НЛС).

Основными ограничениями по размерам обеспечиваемой в навигационном отношении территории, являются:

- а) характеристики бортовых ЭВМ и используемые вычислительные проекции;
- б) физические пространственные возможности оптико-электронных систем (лидаров) по координатной поддержке объектов (абонентов вычислительной сети) – направления, максимальные дальности, точность пеленгации и пр. в условиях конкретной напланетной обстановки и рельефа Луны;
- в) пространственно-технический потенциал развития вычислительной сети и расширения ареала абонентского обслуживания.

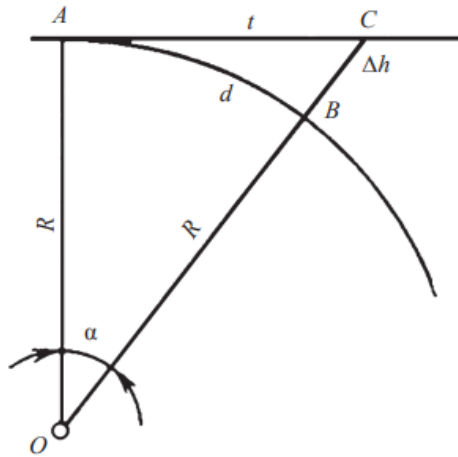
Возможность использования плоских прямоугольных проекций для проведения навигационных расчётов, может оцениваться, в том числе, через относительную ошибку влияния кривизны поверхности планеты на горизонтальные расстояния, которая определяется по следующим формулам:

$$\Delta d = 1/3 (d^3/R^2),$$
$$\Delta d/d = 1/3 (d/R)^2, \text{ где } \Delta d = t-d, \text{ а } \Delta h = OC - OB,$$

Рассчитаем эти значения для разных d и при среднем радиусе Земли $R_z = 6371,11$ км. В таблице на рис. 17 приведены значения Δd , $\Delta d/d$, Δh , $\Delta h/d$ для расстояний от 1 км до 100 км [53].

Как видно из таблицы на рис. 17, при относительной ошибке 1/1 250 000 дугу сферической поверхности Земли $d = 10$ км можно заменить отрезком касательной в средней точке этой дуги, так как при этом относительная ошибка получается меньше 1/500 000 для самых высокоточных измерений длин линий светодальномерами (лидарами). Следовательно, для Земли, участок сферической (уровенной) поверхности с длиной дуги $d =$

10 км можно с неощутимой погрешностью принять за плоский, а кривизной поверхности планеты в пределах указанного участка можно пренебречь.



Влияние кривизны Земли на вертикальные и горизонтальные расстояния для разных длин дуг

Горизонтальные расстояния			Вертикальные расстояния		
d , км	Δd , см	$\Delta d/d$	d	Δh	$\Delta h/d$
1	0,0008	1/10000000	1 км	7,848 см	1/12500
5	0,102	1/5000000	5 км	196 см	1/2551
10	0,82	1/1250000	10 км	7,848 м	1/1274
20	6,5	1/304000	20 км	31,39 м	1/637
30	22,17	1/135318	50 км	196,2 м	1/255
40	52,56	1/76104	50 м	0,02 см	1/250000
50	102	1/49000	70 м	0,385 мм	1/182029
100	820	1/12195	150 м	1,776 мм	1/84947

Рис. 17. К вопросу определения поправок на кривизну поверхности планеты

Величина Δh выражает влияние кривизны Земли на определение высоты точек и называется высотной поправкой за кривизну Земли. Картина влияния кривизны Земли на вертикальные расстояния (в нашем случае это высоты точек) совершенно другая и она рассчитывается, как $\Delta h = d^2 / 2R$. Из таблицы на рис. 6 видно, что при длине дуги в 10 км величина Δh оказывается около 8 м и составляет 1/1274 длины линии. При проведении инженерных изысканий для строительства такой величиной пренебрегать, естественно, нельзя.

Для инженерных целей, например, при дорожных изысканиях, для участка работ протяжённостью 1 км допускается ошибка не более 2 см [53]. Поэтому даже при коротких расстояниях влияние кривизны поверхности Земли на вертикальные расстояния необходимо учитывать.

Если провести указанную выше оценку для условий напланетных работ на Луне, то с учётом её среднего радиуса $R_l = 1737,10$ км, максимально допустимая ошибка по дальности (Δd) 1 - 5 дм [53], достигается на расстоянии 9,6 – 16,5 км, а по высоте (Δh), на расстоянии 0,59 – 1,32 км, соответственно.

Среднеквадратическое отклонение (суммарная пространственная ошибка) расчёта местоположения без учёта кривизны поверхности Луны, определяемое по формуле:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\Delta d^2 + \Delta h^2},$$

что для дальностей (d) 1 км и 5 км, соответственно, составляет: $\sigma\sum 1 = 28,8$ см и $\sigma\sum 5 = 716,9$ см и является, в конечном счёте, производной величиной ошибки по высоте - Δh (ее вклад, во всех случаях, достигает более 99% от суммарного значения данного показателя).

Исследование параметров физического распространения лазерного излучения в условиях земной атмосферы и оценка пространственных возможностей лидаров по пеленгации объектов на максимальной дальности с учётом угла падения лазерного луча, отражающих свойств поверхности, наличия (использования) уголкового отражателей и т. д., позволяет оценить эффективность и точность измерений НЛС в условиях конкретной напланетной обстановки и рельефа Луны.

Основными ограничениями передачи излучения в атмосфере Земли, является поглощение энергии посредством её рассеяния на молекулах газов и водяного пара, входящих в состав воздуха. Другими возмущающими воздействиями являются деформации лазерного пятна в связи возможной локальной турбулентностью атмосферы, а также расширение (расплывание) первоначальной формы пучка и его отклонение от исходного направления распространения из-за изменения показателей преломления среды (оптических свойств атмосферы) [54, 55].

Исследования, проведённые для современных промышленных НЛС, фиксируют следующие средние показатели точности лазерной пеленгации объектов на максимальных дальностях применения данных конкретных импульсных лазерных систем: до 4 мм (Riegl LMS-Z390i, на $d = 400$ м) [56]; до 6 мм [57]; 1-3 мм (Leica Scanstation C10, на $d = 110$ м) [58].

Таким образом, учитывая среднюю величину расходимости лазерного луча современных НЛС в $0,2...0,25$ мрад и представленные выше данные по достижимой точности промышленных лазерных сканеров, можно сделать вывод о том, что в условиях проведения измерений на Луне, предельные погрешности измерений, задаваемые строительными нормативами в 5 дм (часть 1), могут надёжно достигаться на дальностях, превышающих 3,5 - 4 км от источника измерений; для $d = 2 - 2,5$ км, теоретически достигаемая погрешность составляет не более 20 см; величины погрешности до 1 дм сопровождают измерения, проводимые НЛС на дальностях менее полутора километров.

Представленные выше данные позволяют предложить рациональную конфигурацию закреплённых элементов МСК и оценить пространственные точностные характеристики вычислительной сети, построенной на выбранной координатной плоскости. Существует ряд проработанных предложений по созданию простой, точной и малозатратной МСК лунной

базы и её исследовательского полигона – вспомогательной декартовой прямоугольной системы координат, состоящей из нескольких исходных пунктов, оборудованных НЛС (рис. 18) [13, 14].

Идея данной МСК состоит в размещении на ограниченной территории лунной поверхности нескольких излучателей лазерного сканирования, адаптированных для работы в космосе. Их расположение в узлах планово-высотной координатной сети, увязанной и уравненной с учётом требуемого перекрытия зон наблюдения и областей геометрической тени для каждой базовой станции (БС), позволит с гарантированной точностью и надёжностью позиционировать объекты внутри границ полигона (рис. 19).



Рис. 18. Предложения по созданию и использованию МСК на Луне

Учитывая отсутствие на Луне атмосферы, при рассчитываемой индивидуально (относительной и абсолютной) высоте размещения каждого лазерного излучателя (общим числом до 4 базовых станций), можно обеспечить возможность высокоточного планово-высотного позиционирования для осваиваемой территории. Её общая расчётная площадь составляет около 100 км² при обеспечении дециметровой точности на внешних границах полигона, или около 250 км² при обеспечении показателей точности на внешних границах не хуже 1 м, что соответствует требованиям начального этапа освоения Луны (рис. 20).

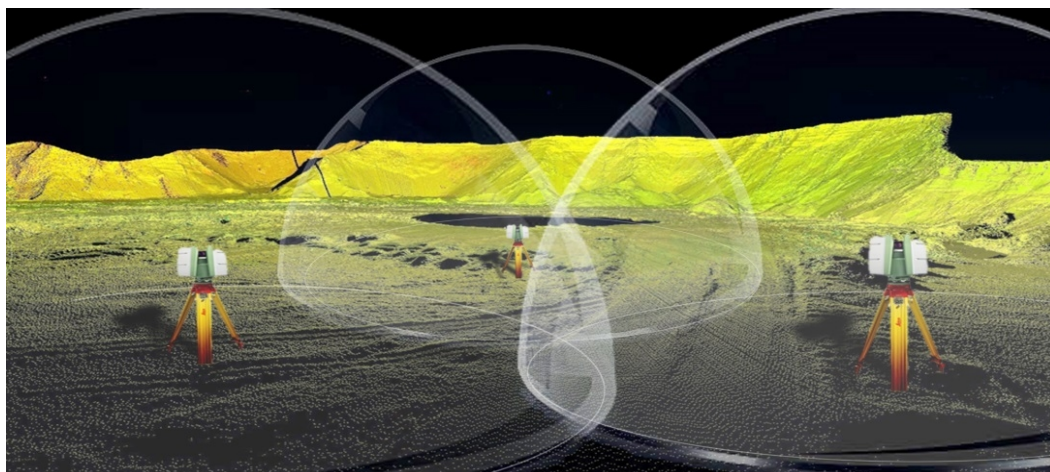


Рис. 19. Размещение лазерных излучателей НЛС на поверхности Луны

Дополнительным положительным фактором применения такой навигационной системы является возможность её пространственного развития и повышение, при необходимости, показателей точности и надёжности представления координатных данных потребителям путём сгущения сети.

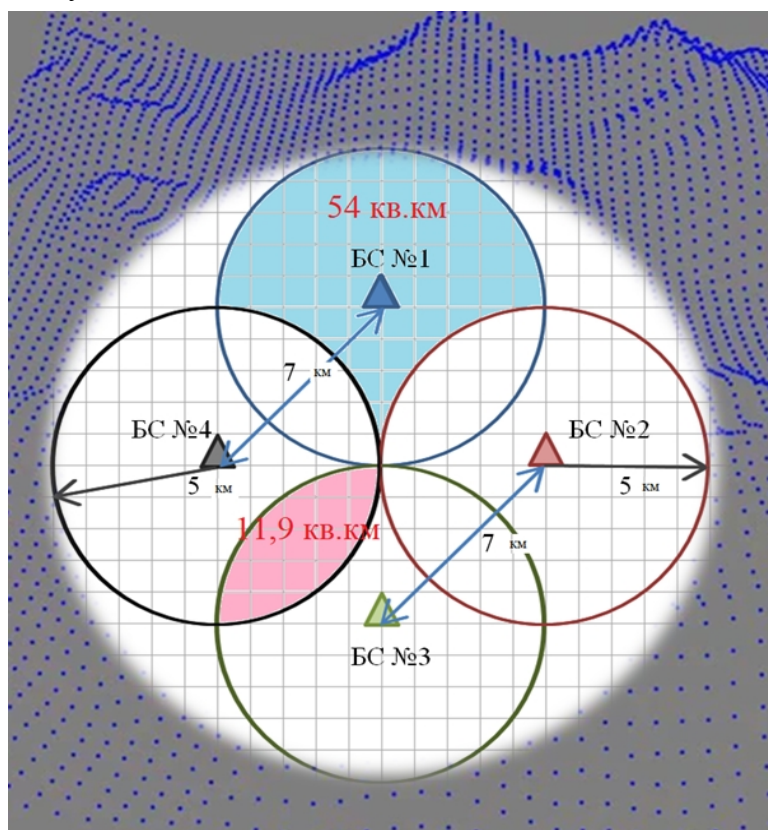


Рис. 20. Относительное позиционирование излучателей НЛС

Оснащение полигона – установка, монтаж и сборка излучателей НЛС, а также их включение в работу – может происходить двумя способами: 1) космонавтами в ходе ВКД

(рис. 21); 2) фиксацией на поверхности после прилунения специализированных посадочных модулей, оборудованных лидарами и осуществляющих миссию непрерывной оптической (лазерной) пеленгации объектов, с последующим обеспечением бортовой обработки цифровой навигационной информации, её хранением и предоставлением потребителям в заданном районе проведения напланетных работ на Луне (космонавтам или РТС).

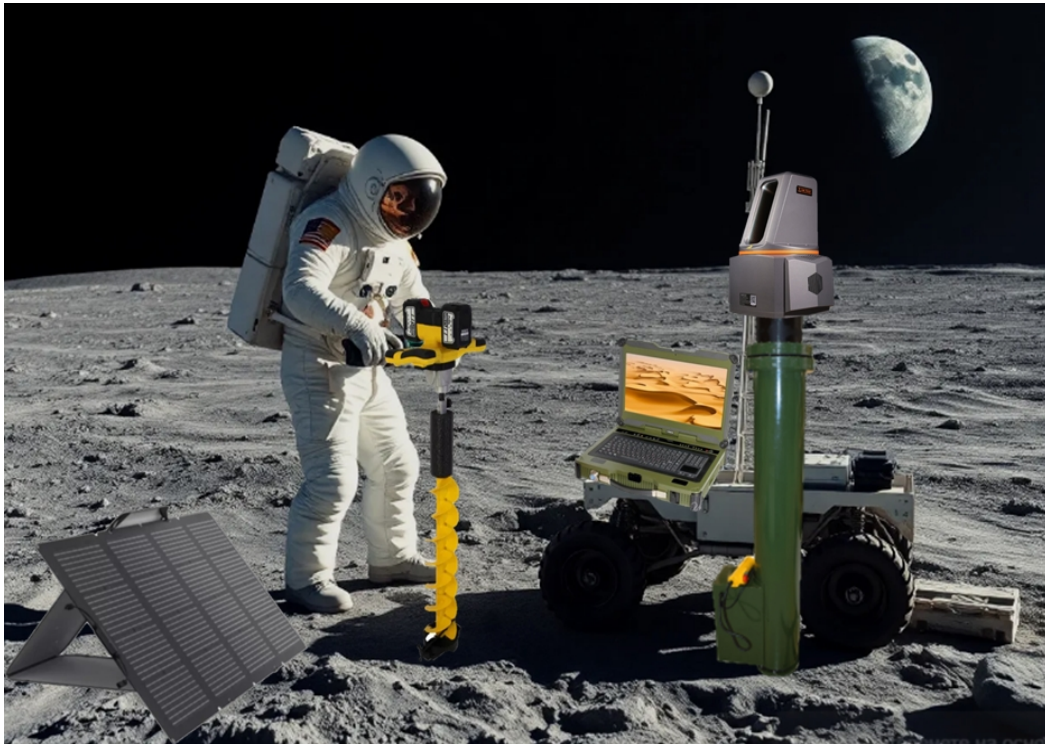


Рис. 21. Навигационное оборудование полигона космонавтами в ходе ВКД

Типовой состав каждой базовой станции НЛС должен включать:

- излучатель напланетного лазерного сканера;
- специальную горизонтированную монтажную платформу;
- управляющий компьютер;
- подсистему передачи данных (модем);
- подсистему электропитания (как правило, солнечная батарея + аккумуляторный блок).

Основной способ развёртывания активного оборудования МСК состоит в установке центрированных и горизонтированных платформ, жёстко закреплённых на специальных заглублённых в реголите мачтах с относительной высотой не менее 2 м. Подъем излучателя на большую высоту, как и увеличение высоты крепления уголкового отражателя, будут влиять на дальность прямой видимости (Дпв), определяемую кривизной поверхности Луны

(уменьшение зоны теней, повышение качества лазерной пеленгации и идентификации объектов) и рассчитываемую как:

$$D_{\text{пв}} = 1,86 \sqrt{H_{\text{нлс}} + ha},$$

где $H_{\text{нлс}}$ – высота излучателя НЛС, ha – высота идентифицируемого объекта (углового отражателя-идентификатора абонента).

Излучатели НЛС размещаются на указанных платформах, а управляющий компьютер и модем располагается в специальном термобоксе на мачте или рядом с ней (рис. 21, 22).

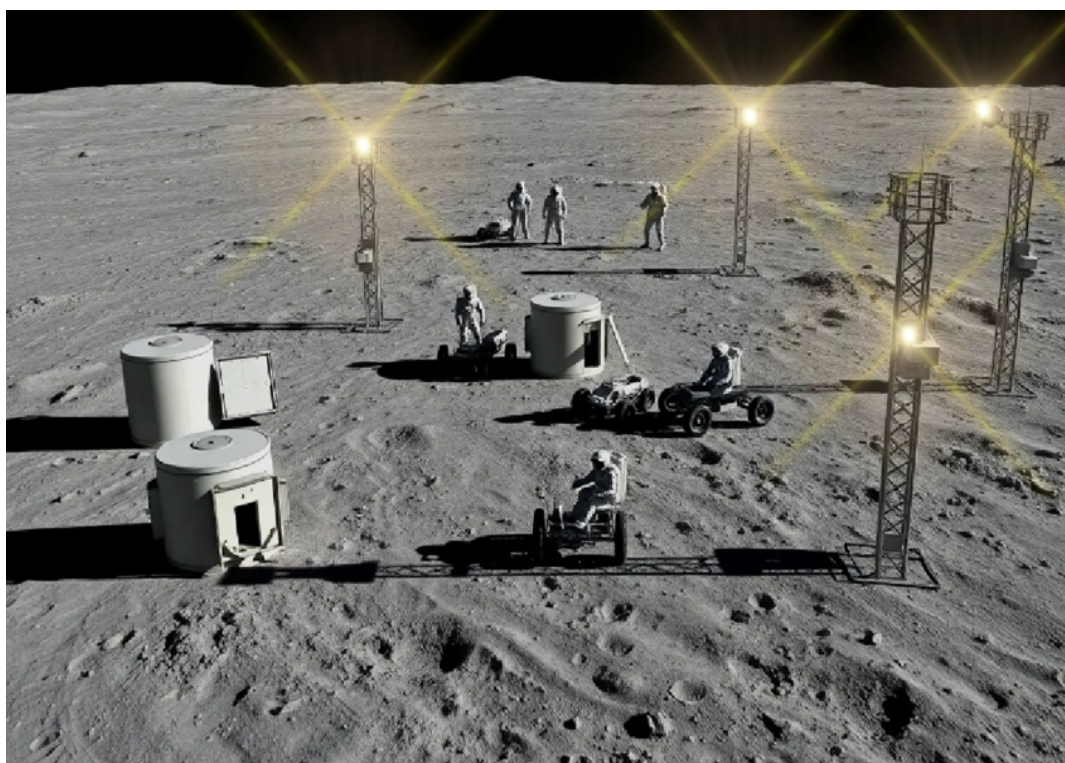


Рис. 22. Расстановка и крепление мачт НЛС на поверхности

Непрерывное электропитание системы осуществляется от солнечных батарей, а дискретное – от аккумуляторов (или, например, генераторов, функционирующих на водородном топливе).

Использование локальных координат сетей, интегрированных с НЛС, является наиболее эффективным методом как в техническом отношении, так и в финансовом плане. Высокая степень его проработанности в земных условиях и относительная простота реализации в космосе по сравнению с глобальными спутниковыми системами позиционирования требуют самого внимательного отношения со стороны экспертного сообщества.

Физическое оснащение ведущей базовой станции современными автоматизированными средствами астрономической навигации (интеграция их элементов в МСК) и привязка каждого из этих активных средств в селенографической и/или планетографической системах координат позволит позиционировать положение объектов на поверхности Луны с абсолютной точностью от 1 до 50 м в целях использования указанных данных внешними потребителями (например, на Земле или лунных орбитах).

Применение описанной выше МСК позволит надёжно решать весь перечень сформулированных навигационных задач и иметь значительный потенциал их развития. Важной особенностью реализации системы на основе сканирующих лидаров является то, что в результате проведения указанных работ, формируется актуальная высокоточная единая пространственная модель территории лунной базы, обеспечивающая 4-D навигацию луноходов, специальной техники и космонавтов при проведении различных видов ВКД.

Высотной отметкой, принимаемой за «0» (ноль) в МСК, может быть жёстко зафиксированное фактическое положение геометрического центра излучателя НЛС основной (ведущей) базовой станции.

Как сказано выше, при необходимости возможен пересчёт высотной координаты этого положения в селенодезической системе координат. Положение опорного меридиана МСК для отсчёта направлений может быть установлено условно, например, как базовая линия, проходящая через две станции НЛС, либо осуществлена его привязка в системе ULCN-2005 (или иной селеноцентрической системе) с учётом существующих погрешностей абсолютного позиционирования современными средствами астронавигации.

Создание и использование единой пространственной модели на основе предлагаемой МСК, в общем случае, состоит в реализации следующих пространственно-технических алгоритмов:

а) круговом или секторном лазерном сканировании территории лунной базы и её полигонов с целью получения исходной (эталонной) пространственной информации обо всех элементах сети для каждой из базовых станций в цифровом виде;

б) взаимной увязке требуемых параметров сети (при числе базовых станций НЛС более одной), первичном формировании и использовании цифровой модели рельефа (ЦМР), а также цифровой модели местности (ЦММ) на основе базовых осей МСК;

в) активном измерении местоположения всех контролируемых объектов и параметров рельефа планеты (с указанной выше точностью), а также передача координатных данных и

меток единого времени (x ; y ; z ; t) всем потребителям сети с заданным темпом обновления пространственной информации лидаром – по запросу или в соответствии с алгоритмом.

При этом, идеология навигационной системы может быть реализована двумя основными программно-аппаратными способами, либо их комбинацией: 1) более простой – получение навигационных параметров для любого внутрисетевого потребителя с высокой дискретностью данных путём их адресной передачи от модема ближайшей (оптимальной) базовой станции на приёмник навигационного устройства соответствующего напланетного транспортного средства, РТС или космонавта; 2) более сложный – измерение относительного положения каждой видимой базовой станции НЛС и иных характерных узловых элементов сети, оборудованных специальными уголковыми отражателями. Выполняется с помощью мобильных лидаров (установленных на каждом или на некоторых (наиболее важных) транспортных средствах, роботах или скафандрах космонавтов), осуществляющих непрерывное круговое сканирование местности с последующим обменом пространственной информацией в сети; 3 – комбинация указанных способов с использованием интеллектуальных средств управления координатной сетью (рис. 23).

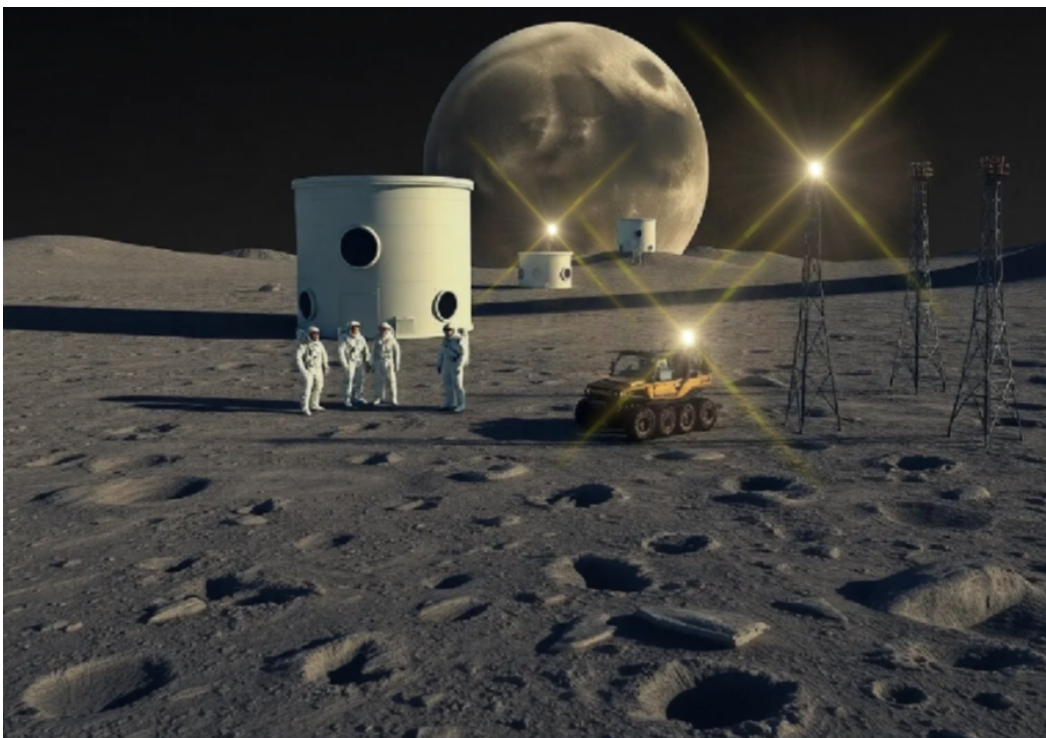


Рис. 23. Комбинированный способ применения лидаров для навигации на Луне

Как указано выше, наиболее доступным вариантом решения навигационных задач в ограниченном районе, является использование плоской прямоугольной Декартовой системы.

В целях повышения точности позиционирования и совершенствования методов напланетной навигации, в дальнейшем возможен переход к расчётам с использованием математических моделей, основанных на алгоритмах сферической тригонометрии.

Основные достоинства использования представленной МСК на Луне:

- 1) простота развёртывания, портативность;
- 2) возможность наращивания элементов системы и периодического переуравнивания сети;
- 3) возможность предварительной отработки и отладки технологии НЛС на Земле;
- 4) высокая внутренняя сходимость координат (относительная точность позиционирования) и универсальная форма их цифрового представления;
- 5) большой технический ресурс системы;
- 6) невысокая сравнительная стоимость;
- 7) простота обслуживания, ремонта и модернизации;
- 8) обеспечение максимальной автоматизации работ благодаря применению универсальных цифровых форматов данных;
- 9) селенодезическая привязка центра МСК в глобальных системах координат (для внешнего использования) с возможно достижимой современной точностью абсолютного позиционирования;
- 10) адресность представления навигационных данных;
- 11) высокая надёжность и непрерывность работы в условиях космоса;
- 12) низкие энергетические затраты;
- 13) использование координатной информации сети в целях высокоточной текущей навигации абонентов, а также для получения и актуализации данных ЦМР и ЦММ протяжённых лунных территорий.

Заключение

Применение высокоточных пространственных данных, полученных на основе использования МСК, позволит определять абсолютное и относительное положение внутрисетевых объектов и решать все виды навигационных задач на локальной территории Луны. К ним, прежде всего, относятся - сопровождение и контроль хода строительно-

монтажных работ, координатное обеспечение научных космических исследований и экспериментов, а также повышение надёжности и безопасности проведения пилотируемой напланетной деятельности.

В настоящее время существуют отработанные технологии наземного лазерного сканирования, адаптация которых для условий Луны обеспечит оперативную и высокоточную пеленгацию артефактов и природных образований на её поверхности.

Использование цифровых пространственных данных, характеризующих состояние лунных территорий и напланетных инфраструктурных объектов позволит проводить оперативное управление лунной базой, а также осуществлять её эффективное развитие.

Список литературы

1. Леонов В. А. *Постоянная лунная станция как приоритет России в освоении ресурсов космоса* // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 4. С. 56-67.
2. Кричевский С.В. *Освоение Луны: история, модель, сверхглобальный проект и экологичные технологии* // Воздушно-космическая сфера. 2019. №3. С. 16-25.
3. Дикарев В.А., Дубинин В.И., Симбаев А.Н., Кикина А.Ю., Чеботарев Ю.С., Никитов Э.В., Розанов И.А. *Исследование возможностей использования робототехнических систем для поддержания операторской деятельности экипажей и формирования экосистемы / микроклимата сотрудничества* // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – № 2 (47). – С. 15-31.
4. Дикарев В.А., Симбаев А.Н., Кикина А.Ю., Чеботарев Ю.С., Никитов Э.В., Буковская И.А., Белявский А.Е. *Об обеспечении коллаборации космонавтов с робототехническими системами для перспективных пилотируемых полётов* // Пилотируемые полеты в космос. – 2024. – № 4 (53). – С. 36-47.
5. ГОСТ Р 51872-2002 «Документация исполнительная геодезическая. Правила выполнения».
6. Майборода А. О. *Эффективные способы защиты от космических факторов в межпланетном полёте и внеземной колонии* // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 3. С. 32-41.
7. Багров А. В., Леонов В. А. *Проблемы перехода от исследований Луны к ее освоению* // Воздушно-космическая сфера. 2020. №3. С. 22-33.

8. *DARPA примет участие в разработке лунной инфраструктуры*. Документ электронный: URL: <https://www.ixbt.com/news/2023/08/16/darpa-primet-uchastie-v-razrabotke-lunnoj-infrastruktury.html> (дата обращения: 27.12.2024).
9. Александрова Е.А. *В США показали проект инфраструктуры для крупной лунной базы*. Документ электронный: URL: <https://naked-science.ru/article/cosmonautics/v-ssha-rokazali-proekt-in> (дата обращения: 27.12.2024).
10. *Соглашение между правительством РФ и правительством КНР «О сотрудничестве в области создания международной научной лунной станции»*. Документ электронный: URL: https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/international_contracts/international_contracts/2_contract/61731/ (дата обращения: 27.12.2024).
11. Белоусов Р.Н. *Лунная станция России и Китая будет осваивать новые виды ресурсов: объявлено об амбициозной космической программе двух государств. Россия и Китай договорились о создании лунной станции к 2035 году*. Документ электронный: URL: <https://www.kp.ru/daily/27484/4740882/?ysclid=m7btd9nics192893111> (дата обращения: 27.12.2024).
12. *The Global Exploration Roadmap*. Документ электронный: URL: https://global.jaxa.jp/projects/sas/planetary/files/roadmap_e.pdf Документ электронный: (дата обращения: 27.12.2024).
13. *Япония планирует построить завод на Луне для производства водородного топлива*. Документ электронный: URL: <https://dzen.ru/a/X3YaOg1fiVHJx8iu> (дата обращения: 27.12.2024).
14. Болкунов, А.И. *Разработка и применение методики оценки эффективности глобальных навигационных спутниковых систем*. Диссертация по ВАК РФ 05.13.01, кандидат технических наук. 2011. – 155 с.
15. Kulikov I.N., Kryuchkov B.I. *Interpretation of the Moon Probing Signals During Landing Using Laser Scanning Systems* // Ежегодный междисциплинарный альманах "Геоконтекст", том 11 №1. – 2023. – С. 5-16. Документ электронный: URL: <https://www.geo-context.org/index.php/geocontext/issue/view/11> (дата обращения: 27.12.2024).
16. Крючков Б.И., Усов В.М., Ярополов В.И. и др. *Об особенностях профессиональной деятельности космонавтов при осуществлении лунных миссий* // Пилотируемые

- полеты в космос. – 2016. – № 2 (19). – С. 35-57.
17. Шибанов Г.П. *Обитаемость космоса и безопасность пребывания в нём человека*. М.: Машиностроение, 2007. - 544 с.: ил.
18. ГОСТ Р 21.301-2021 *Система проектной документации для строительства. Правила выполнения отчётной технической документации по инженерным изысканиям*.
19. Петров О.Ф., Зобнин А.В., Липаев А.М., Наумкин В. Н. и др. *Предварительные итоги российско-европейского космического эксперимента «Плазменный кристалл» на научной аппаратуре «плазменный кристалл-4»* // Пилотируемые полеты в космос. – 2024. – № 4 (53). – С. 48-66.
20. Попель С.П. *Лунная пыль* // «Химия и жизнь» №5, 2018. Документ электронный: URL: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/434299/Lunnaya_pyl (дата обращения: 27.12.2024).
21. Багров А.В. *Исследование и промышленное освоение космических ресурсов* // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 1. С. 90-97.
22. Постановление Правительства Российской Федерации №20 от 19 января 2006 года «Об инженерных изысканиях для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства» (с изменениями на 15.09.2020 г).
23. ISO 22932-1:2020 *Горное дело. Словарь. Часть 1. Планирование и изыскания*.
24. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 №190-ФЗ (ред. от 26.12.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025). Статья 48.1. ГрК РФ «Особо опасные, технически сложные и уникальные объекты».
25. Борисенко Д. И. *Природоподобный способ освоения Луны* // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 3. С. 42-49.
26. Шустов Б.М. *Космические ресурсы для развития экономики и науки* // Воздушно-космическая сфера. 2019. №4. С. 46-55.
27. *Определение основных видов нарушений требований проектной документации и нормативных документов в области строительства*. Документ электронный: URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/1d8/4293747342.pdf> (дата обращения: 27.12.2024)
28. *Характерные нарушения норм и правил при строительстве объектов*. Документ электронный: URL: <https://igsnur.udmurt.ru/about/info/messages/243/> (дата обращения:

- 27.12.2024).
29. *Инженерные изыскания. Недооценка и последствия*. Документ электронный: URL: <https://www.engeco.ru/information/inzhenernye-izyskaniya-nedootsenka-i-posledstviya> (дата обращения: 27.12.2024)
30. СП 317.1325800.2017. *Инженерно-геодезические изыскания для строительства*. Общие правила производства работ.
31. «Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта...» Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии, приказ от 23 октября 2020 г. № П/0393 Документ электронный: URL: https://rkc56.ru/attach/orenburg/Img/news/2020/Prikaz-Rosreestra-ot-23.10.2020-N-P_0393.pdf?ysclid=mauzi82wj779377408 (дата обращения: 27.12.2024).
32. *Определение основных видов нарушений требований проектной документации и нормативных документов в области строительства. Методические рекомендации*. Документ электронный: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200101575> (дата обращения: 27.12.2024).
33. *Вынос границ земельного участка в натуру: зачем и как его выполняют*. Документ электронный: URL: <https://m-strana.ru/articles/vynos-granits-zemelnogo-uchastka-v-naturu/> (дата обращения: 27.12.2024).
34. Огородова Л.В., Половнев О.В. *Учебно-методическое пособие по курсу Высшая геодезия и основы координатно-временных систем*. – М.: Издательство МИИГАиК, 2016. 67 с. ISBN 975-5-91188-000-0.
35. М. М. Пшеничная, И. М. Кравчук. *Создание вспомогательной геодезической сети на Луне* // Пространственные данные: наука и технологии. Сборник статей по итогам научных конференций. М., 2021. № 12. С. 75-81. DOI:10.30533/scidata-2021-12-75-81.
36. Баженов, А.В. *Радионавигационные системы* / Учебное пособие. А.В. Баженов, Г.И. Захаренко, А.Н. Бережнов, К.Ю. Савченко./ Под ред. А.В. Баженова – Ставрополь: СВВАИУ (ВИ), 2007. – 202 с.
37. Шамтов М.С., Аникин И.А., Тарасов А.А. *Обзор и анализ современных радиотехнических систем навигации гражданской авиации* (документ электронный): URL: <https://na-journal.ru/6-2023-radiotekhnika-akustika/5910-obzor-i-analiz-sovremennyh->

- radiotekhnicheskikh-sistem-navigacii-grajdanskoj-aviacii?ysclid=m731smr8dd958440765 (дата обращения: 27.12.2024).
38. Кишко Д.В. *Повышение точности определения навигационных параметров вертолѐта при посадке на корабль*. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. МАИ, 2015.- 160 с.
39. *Луна – шаг к технологиям освоения Солнечной системы* / Под научной редакцией В.П. Легостаева и В.А. Лапоты. – М.: РКК «Энергия». 2011. - 584 с.
40. Андреев А.О., Нефедьев Ю.А., Демина Н.Ю., Петрова Н.К., Загидуллин А.А. *Разработка методов навигационной привязки окололунных космических аппаратов к селеноцентрической динамической системе координат* // *Астрономический журнал*, 2020, том 97, № 9, с. 765–775.
41. Демина Н.Ю., Андреев А.О., Петрова Н.К., Ахмедшина Е.Н., Мубаракшина Р.Р., Сергиенко М.В., Чуркин К.О., Корчагина Е.П. *Создание селеноцентрической системы на основе квантово–оптических средств наблюдений и данных космических миссий*. - Казань: Казан. фед. ун-т, 2023.- 149 с.
42. Дмитриев А. О. *Концепция оптической навигационной связной системы для Луны*. Электронное научное издание «Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление» www.rypravlenie.ru том 16 № 3 (48), 2020, ст. 10. Документ электронный: URL: <https://www.rypravlenie.ru/wp-content/uploads/2020/10/10-Dmitriev.pdf> (дата обращения: 27.12.2024).
43. Багров А.В., Дмитриев А.О., Леонов В.А., Москатиных И.В., Сысоев В.К., Ширшаков А.Е. *Построение оптической лунной навигационной системы на базе космических аппаратов АО «НПО Лавочкина»* // *Космическая техника и технологии* № 4(27)/2019. С. 12-26.
44. Багров А.В, Дмитриев А.О., Леонов В.А., Митькин А.С., Москатиных И.В., Сысоев В.К., Ширшаков А.Е. *Глобальная оптическая навигационная система для Луны*. Труды МАИ. Выпуск № 99. 2018. 21 с. - Документ электронный: URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=91814> (дата обращения: 27.12.2024).
45. *Учёные предлагают создать "Лунный ГЛОНАСС" из 18 спутников*. Электронный документ: URL: <https://tass.ru/kosmos/3912943> (дата обращения: 27.12.2024).
46. Микрин Е. А., Михайлов М. В., Орловский И. В., Рожков С. Н., Краснопольский И. А. *Спутниковая навигация окололунных космических аппаратов и объектов на*

- поверхности Луны. // Гироскопия и навигация. Том 27, № 1 (104), 2019. С. 22-32.*
47. ГОСТ 32453—2017. *Глобальная навигационная спутниковая система. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ. Методы преобразований координат определяемых точек.* 2017 г, 23 с
48. Гордиенко Е.С., Ивашкин В.В., Симонов А.В. *Анализ устойчивости орбит искусственных спутников Луны и выбор конфигурации лунной навигационной спутниковой системы // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4. С. 40-54.*
49. Куликов И.Н. *Лазерные сканирующие устройства и их использование в перспективных лунных миссиях // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – № 4 (41). С. 57–74.*
50. Харламов М.М., Дубинин В.И., Куликов И.Н., Крючков Б.И., Фомина Е.В. *Навигация на лунной базе при проведении космонавтами научных экспериментов // Материалы 45 международного научного конгресса COSPAR-2024. Научная Ассамблея, Корея, Пусан. 13–21 июля 2024.*
51. *Правила установления местных систем координат.* Постановление правительства РФ №139 от 3 марта 2007 г. Электронный документ: URL: <https://docs.cntd.ru/document/902030825> (дата обращения: 27.12.2024).
52. Обиденко В.И. *Единое высокоточное гомогенное координатное пространство территорий и местные системы координат: пути гармонизации // Вестник СГУГиТ, Том 25, № 2, 2020. С. 46–62.*
53. Левитская Т.И. *Основы геодезии. Учебное пособие / М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. — 2-е изд., перераб. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 88 с. ISBN 978-5-7996-2199-5.*
54. *Лазерное излучение.* Под общ. Редакцией В.Я. Гранкина. М., Воениздат, 1977. — 192 с.
55. Кириллов Г.А., Захаров Н.Г. *Пособие по физике лазеров. 2-е изд. стереотип. / -* Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2020. – 236 с; ил.
56. Алексей Комраков. *Лазерная трёхмерная сканирующая система Riegl.* Электронный документ: URL: <https://sapr.ru/article/19709?ysclid=m8ehpgaymb740408284> (дата обращения: 27.12.2024).
57. Алексеева О.А., Алфёров Н.А., Созонов П.С. *Возможности лазерного сканирования и фотограмметрии.* Электронный документ: URL: https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/andreeva_alfyorov_sozonov._voz

mozhnosti_ls_i_fotogr.pdf (дата обращения: 27.12.2024).

58. Середович В.А., Иванов А.В. *Исследования точности измерений, выполненных наземным лазерным сканером*. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 1. № 3. С. 134-143.
59. НАСА/ТМ–2020-220442. *Перспективы инфраструктуры дальнего космоса, развития и колонизации*. Исследовательский центр Денниса М. Бушнелла и Роберта В. Мозеса Лэнгли, Хэмптон, Вирджиния. Февраль 2020. Электронный документ: URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20200001142> 2020-03-28T19: 03: 58+00: 00Z (дата обращения: 27.12.2024).