

УДК 520.6

ЛУНА-25: ПЕРВАЯ ПОЛЯРНАЯ МИССИЯ НА ЛУНУ

© 2021 г. И. Г. Митрофанов^a, Л. М. Зеленый^a, В. И. Третьяков^{a, *}, Д. В. Калашников^a

^aИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 10.05.2021 г.

После доработки 16.06.2021 г.

Принята к публикации 05.07.2021 г.

В статье представлено описание предпосылок, истории, предполагаемых районов посадки, научной аппаратуры и плана реализации первой российской лунной полярной посадочной миссии Луна-25. В работе обсуждаются планируемые результаты миссии, ее роль в отечественной лунной программе.

Ключевые слова: Луна, Луна-25, приполярные области, научная аппаратура, лунный грунт, водяной лед, освоение, лунная программа, районы посадки

DOI: 10.31857/S0320930X21060098

ВВЕДЕНИЕ: НАУЧНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

На рубеже XX и XXI веков в космических исследованиях Луны произошли события, которые, вероятно, надолго определят развитие мировой космонавтики. В 1998 г. участники достаточно скромного по меркам NASA проекта Lunar Prospector обнаружили, что вызванное галактическими космическими лучами вторичное излучение энергичных нейтронов с поверхности Луны значительно ослабляется в окрестности ее полюсов (Feldman и др., 1998). Группой экспериментаторов из Лос-Аламосской национальной лаборатории под руководством У. Фельдмана в качестве возможной причины этого эффекта было предложено повышенное содержание воды в полярном реголите (Feldman и др., 1998). Известно, что наличие ядер водорода в веществе приводит к эффективному замедлению энергичных нейтронов. Поэтому поток надтепловых нейтронов с поверхности реголита должен заметно уменьшаться в том случае, когда в нем присутствует хотя бы несколько процентов воды (Feldman и др., 1998; Sanin и др., 2017). Открытие ослабления нейтронного излучения с полярных областей Луны можно считать первым наблюдательным свидетельством присутствия значительного количества воды в полярном лунном реголите. Поскольку на полюсах Луны очень холодно, речь может идти о залежах водяного льда. Было высказано предположение, что лед мог бы накопиться в “холодных ловушках” на дне постоянно затененных полярных кратеров, где могли бы оседать блуждающие в лунной экзосфере молекулы воды, принесенные на Луну кометами, или образовавшиеся на ней из протонов солнечного ветра (Feldman и др.,

1998). Интересно отметить, что гипотезу о лунных полярных ледниках впервые высказал К.Э. Циолковский еще в 1920 г. (Циолковский, 1920).

Предположение о наличии на Луне водяного льда получило подтверждение благодаря эксперименту NASA M3 под руководством Pieters (Pieters и др., 2009): в 2009 г. было проведено глобальное картографирование лунной поверхности в ИК-диапазоне с борта индийского лунного спутника Chandrayaan-1. В спектре ИК-излучения Луны была обнаружена спектральная линия в окрестности длины волны 3 мкм, которая указала на присутствие в веществе приполярной поверхности Луны молекул воды или гидроксила (Sunshine и др., 2009; Clark, 2009). После сообщения об этом открытии присутствие воды на лунных полюсах стало общепризнанным фактом.

Этот факт вызвал переворот во взглядах идеологов космонавтики о направлении космических исследований в XXI веке. Из полузабытой арены “лунной гонки” СССР и США в середине XX века Луна превратилась в космический континент для освоения земной цивилизацией. Вначале полярную “вечную мерзлоту” стали рассматривать как природный ресурс, который обеспечит будущих исследователей Луны воздухом, водой и ракетным топливом. Затем было осознано, что лунная вода — это не только ресурс, но и уникальный объект для фундаментальных научных исследований (Митрофанов, 2017). Несколько миллиардов лет кометы доставляли на Луну воду межзвездного происхождения вместе с растворенными в ней химическими соединениями, молекулами и сложными молекулярными комплексами. 4 млрд лет тому назад такая же вода доставлялась кометами на

поверхность молодой Земли — и примерно в это время в первичном земном океане зародилась жизнь. Изучение сохранившихся в лунных ледниках высокомолекулярных соединений космического происхождения может приоткрыть тайну зарождения жизни на Земле, позволит сравнить биохимические молекулярные структуры на Земле и в космосе.

Приборы на борту аппаратов Lunar Prospector и Chandrayaan-1 не имели необходимого пространственного разрешения для того, чтобы построить карты залежей льдов вечной мерзлоты и подтвердить (или опровергнуть) гипотезу об их связи с постоянно затененными районами на дне полярных кратеров (Mitrofanov и др., 2010b). Поскольку вопрос о распространенности лунных ресурсов начал представлять практический интерес, в NASA было решено направить в 2009 году к Луне в одном запуске на ракете-носителе Атлас V два космических аппарата — лунный спутник LRO (Chin и др., 2007; Vondrak, 2012) и исследовательский аппарат-камикадзе LCROSS (Heldmann и др., 2012). Приборы первого аппарата были предназначены для детальной разведки полярных районов с низкой полярной орбиты для поиска района с максимальным содержанием воды. Второй аппарат должен был дожидаться первых результатов исследований с орбитального аппарата для прямого исследования состава вещества в районе с наибольшим ожидаемым содержанием воды в грунте. На борту аппарата LRO был установлен российский нейтронный телескоп ЛЕНД (Mitrofanov и др., 2010a). После двух месяцев накопления данных для построения карт нейтронного излучения окрестностей южного полюса участники эксперимента ЛЕНД обнаружили такой район — им оказался кратер Кабео (координаты центра $85^{\circ}20'$ ю.ш., $42^{\circ}08'$ з.д.) (Mitrofanov и др., 2010b). 9 октября 2009 г. космический комплекс, состоящий из разгонного блока Centaur и аппарата LCROSS был направлен в этот район для столкновения с поверхностью. Перед столкновением комплекс разделился, и в 11 ч 31 мин. UTC блок Centaur в качестве пассивного ударника столкнулся с поверхностью Луны на дне кратера Кабео. Спустя четыре минуты столкнулся с поверхностью и аппарат LCROSS, который перед этим прошел через облако выброшенного вещества и выполнил прямые измерения его состава. Данные измерений показали, что в выброшенном лунном веществе содержатся около 5% воды и многие летучие соединения, такие как сероводород, аммиак, диоксид серы (Solarrete и др., 2010). Таким образом, наличие значительной доли воды в лунном полярном реголите было подтверждено прямыми измерениями.

Нейтронное картографирование лунной полярной поверхности нейтронным телескопом ЛЕНД продолжается по настоящее время. По-

строена подробная карта массовой доли воды в лунном грунте (Sanin и др., 2017). Оказалось, что условие постоянного затенения от солнечных лучей на дне полярных кратеров не является обязательным — водяной лед присутствует в веществе под укрывающим слоем реголита с толщиной порядка от нескольких сантиметров до десятков сантиметров и в тех областях, которые регулярно освещаются Солнцем. Это означает, что космический аппарат для изучения и добычи лунной воды не обязательно направлять на дно затененного полярного кратера — его можно посадить на освещаемую поверхность в окрестности полюса и оснастить манипулятором или буровой установкой для доступа к веществу непосредственно под поверхностью.

Можно утверждать, что два указанных выше научных факта о Луне — наличие в полярном реголите значительной доли водяного льда и возможность присутствия льда в веществе полярных районов, которые регулярно освещаются Солнцем — определили концепцию первого этапа российской лунной программы с применением автоматических лунных станций. Первой в последовательности этих станций станет российская автоматическая станция Луна-25.

СЛОЖНАЯ СУДЬБА ЛУНЫ-25

Как только новые данные о полярной Луне были достоверно подтверждены, вопросы возрождения отечественной лунной космонавтики начали активно обсуждаться среди ученых и конструкторов космической техники. Стало понятно, что наличие на Луне водных ресурсов коренным образом изменяет статус этого небесного тела среди других объектов научных космических исследований. Луна стала рассматриваться не только как ближайшее к Земле небесное тело Солнечной системы, но также как объект будущего освоения, как будущий форпост человечества в космосе за пределами околоземных орбит.

Данная статья посвящена первой российской лунной миссии, история разработки которой оказалась достаточно сложной. Прежде всего необходимо пояснить, как космический аппарат Луна-Ресурс для совместного российско-индийского проекта превратился в отечественный аппарат Луна-25.

История проекта Луна-25 берет свое начало в 1997 г., когда научная космическая общественность пересматривала планы планетных исследований после катастрофы проекта Марс-96. Этот дорогостоящий проект был унаследован от советской марсианской программы и должен был начать российские исследования Марса, которые далее предполагалось выполнять совместно с американцами по программе “Mars Together”.

Вместе с почти семитонным аппаратом ушла в небытие и эта программа. В 1997 г. было решено самостоятельно выполнить два планетных проекта: Фобос-Грунт, по доставке на Землю образцов вещества спутника Марса Фобоса, и Луна-Глоб. Концепция лунного проекта была представлена в октябре 1998 г. академиком Э.М. Галимовым и его коллегами из Института геохимии и аналитической химии РАН им. В.И. Вернадского, НПО им. С.А. Лавочкина и Объединенного института физики Земли РАН на Международной конференции по исследованию и освоению Луны, проходившей в Москве и сопряженной с 3-й сессией ILEWG. Целями проекта Луна-Глоб были, во-первых, изучение внутреннего строения Луны на основе данных глобальной сети малых сейсмометрических станций на борту большого числа пенетраторов и малых посадочных аппаратов, и, во-вторых, исследование условий в окрестности Южного полюса с борта автоматической посадочной станции в затененном районе с координатами 88° ю.ш. и 38° в.д. (Галимов, 2013). Дата запуска проекта была намечена на 2000 г. (Галимов, 2013). Следует отметить, что Э.М. Галимов при обосновании научной значимости проекта указал на возможное присутствие летучих соединений и водяного льда на лунных полюсах. Впоследствии в связи с недостатком финансирования основной приоритет получил проект Фобос-Грунт и также астрофизические обсерватории “Спектр”, а работы по лунному проекту были временно остановлены.

В последующие годы работы по проекту Луна-Глоб фактически не велись. Его сторонники активно боролись за их возобновление, в том числе в рамках международной кооперации (Галимов, 2013). Такая возможность появилась в 2006 г. благодаря подписанию межправительственного соглашения о космическом сотрудничестве с Индией. В это время ученые институтов РАН и специалисты Научно-производственного объединения им. С.А. Лавочкина представили на рассмотрение отечественного космического сообщества концепцию последовательности лунных миссий на автоматических посадочных и орбитальных аппаратах, которые должны были выполнить пионерские исследования природной среды на лунных полюсах и закрепиться в наиболее перспективном приполярном районе для его дальнейшего исследования в научных и практических целях, в том числе в рамках пилотируемых экспедиций (про первоначальные планы лунной программы см.: Луна — шаг к технологиям освоения Солнечной системы, 2011).

Первым в череде этих проектов значился давно ожидавший своего времени космический комплекс Луна-Глоб, в состав которого входили лунный спутник для глобальной разведки поверхности с полярной орбиты и посадочный аппарат для

детального изучения свойств поверхности и экзосферы в окрестности южного полюса. Практически одновременно с этим проектом разрабатывался проект Луна-Ресурс, который планировалось реализовать в рамках индийско-российского сотрудничества. Так как в этом проекте предполагалось использовать индийскую ракету GSLV Mk. II с относительно меньшей грузоподъемностью, чем у российской ракеты-носителя “Союз”, с одновременным запуском на ней российского посадочного аппарата с индийским мини-луноходом на борту и индийского орбитального аппарата, масса комплекса научной аппаратуры составляла всего 30 кг.

В 2010 г. в секции планетных исследований Совета РАН по космосу прошел конкурсный отбор научных приборов для двух посадочных аппаратов проектов Луна-Глоб и Луна-Ресурс. Разработка лунных проектов проводилась с учетом опережающего создания космического аппарата для проекта Фобос-Грунт с намеченной датой запуска в ноябре 2011 г. Основные бортовые системы космического аппарата этого проекта планировалось в дальнейшем использовать для лунных миссий. Однако уже на самом начальном этапе полета на околоземной орбите Фобос-Грунт потерпел аварию из-за нештатной ситуации на борту. Эта вторая после Марса-96 авария межпланетной миссии тоже отразилась на судьбе проекта Луна-Глоб. По итогам изучения возможной причины аварии было решено существенно перестроить план реализации лунных проектов Луна-Глоб и Луна-Ресурс и расширить программу их наземной экспериментальной отработки. Кроме этого, было решено, что следует провести разработку и летные испытания лунных автоматических аппаратов без привлечения для их реализации международной кооперации.

В апреле 2012 г. на Совете РАН по космосу было согласовано, что реализация отечественной программы начнется с экспериментального научно-технологического проекта с применением относительно более легкого посадочного аппарата, ранее предназначенного для российско-индийского проекта. Этот проект по формально-бюрократическим причинам получил название Луна-Глоб, и запуск его космического аппарата был намечен на российской ракете-носителе Союз-2 в 2015 г. Следом за этим проектом были намечены миссии с орбитальными и посадочными аппаратами с максимально возможными комплексами научной аппаратуры, допустимыми для запусков на ракетах-носителях Союз-2 в 2016 и 2017 гг. соответственно. По аналогичной формально-бюрократической причине опытно-конструкторские разработки этих двух проектов получили названия Луна-Ресурс-Орбитальный и Луна-Ресурс-Посадочный. Эти проекты должны были быть реализованы на основе опыта предшеству-

ющего экспериментально-технологического проекта Луна—Глоб.

Очевидно, что новый план выполнения первых лунных миссий был гораздо предпочтительнее первого. Он позволил выстроить технологически преемственную “диагональ” реализации все более усложняющихся лунных проектов с постепенно расширяющимися программами научных исследований. Этот план по рекомендации РАН был включен в Федеральную космическую программу на период 2016—2025 гг. В настоящее время он претерпел два важных изменения.

Во-первых, многочисленные обсуждения нового плана лунной программы стихийно и вопреки формально-бюрократической терминологии привели к использованию новых названий у планируемых проектов: вместо исходного названия Луна—Глоб, которое представляется достаточно странным для полярной посадочной миссии, первый российский лунный космический аппарат получил имя Луна-25. Последующие за ним проекты Луна—Ресурс—Орбитальный и Луна—Ресурс—Посадочный стали “Лунами” с возрастающими номерами 26 и 27. Так восстановилась последовательность, которая берет свое начало с королёвской Луны-1, ставшей в 1959 г. первой искусственной планетой. Эта последовательность также включает Луну-3, в том же году осуществившей фотографирование обратной стороны Луны, Луну-9, в 1966 г. впервые осуществившая мягкую посадку на поверхность нашего естественного спутника, Луну-16, в 1970 г. впервые доставившую с Луны на Землю в автоматическом режиме образцы лунного грунта, Луну-17, 17 ноября 1970 г. опустившую на лунную поверхность автоматический самоходный аппарат Луноход-1.

Во-вторых, сместились вправо даты планируемых стартов. Вместо исходно намеченного 2015 г. в настоящее время реализация проекта Луна-25 приходится на 2022—2023 гг. Задержка составила 7 лет. Безусловно, одной из причин стали трудности разработки новых бортовых систем вместо уже утраченных прототипов, созданных более 50 лет назад с применением прежней элементной базы. Также сказались недавно введенные санкционные ограничения на поставку из-за границы многих компонентов, с применением которых в условиях “свободного рынка” были разработаны прототипы научных приборов и служебной аппаратуры. Западные компании, которые активно продвигали свою продукцию на российский космический рынок, после 2014 г. отказались ее поставлять. Потребовалось значительное время на “переработку” уже разработанной аппаратуры с переходом на отечественную компонентную базу.

Также следует отметить, что на фоне объективных проблем причиной сдвига вправо сроков выполнения этапов работ является сложившаяся практика чрезмерно формализованного руководства проектами. Она особенно неблагоприятно сказывается в ходе разработки новой бортовой аппаратуры. При возникновении технической проблемы время согласования в различных инстанциях предложенного варианта ее решения зачастую значительно превышает срок практической реализации этого варианта. Основной причиной, препятствующей успешному развитию научной космонавтики, является применение закона 44-ФЗ для законодательного обеспечения НИОКР. Этот, рыночный по своей сути, закон, вероятно, хорошо работает при выполнении заказов на серийную продукцию. Но при создании инновационной техники единичного исполнения часто возникают ситуации, когда исходные требования оказываются неосуществимыми или неоптимальными и возникает необходимость внесения изменений в техническое задание, в план-график или в условия финансирования НИОКР. Процесс такой корректировки, основанный на нормах 44-ФЗ, оказывается сложным по процедуре и затратным по времени. Этот закон не учитывает, что при создании новой техники основным ресурсом зачастую является не деньги, а время. Вся успешная история советской космонавтики подтверждает это утверждение.

В настоящее время ситуация с оперативным управлением в космической отрасли постепенно улучшается. Можно надеяться, что приобретенный опыт создания космического комплекса Луна-25 внесет значительный вклад в этот процесс. От успеха этой миссии во многом зависит реализация последующих проектов на автоматических станциях, а также выполнение первой российской лунной пилотируемой экспедиции, намеченной на 2030 г. (рис. 1).

РАЙОНЫ ПОСАДКИ ДЛЯ МИССИИ ЛУНА-25

Как уже отмечалось, после неудачи проекта Фобос-Грунт миссия Луна-25 была предложена, как, в первую очередь, экспериментальный проект для летных испытаний и отработок новых бортовых систем, с применением которых будут реализовываться последующие лунные проекты на автоматических станциях. Допустимая полная масса научных приборов на борту аппарата составила всего 30 кг. Однако научной группе проекта удалось сохранить в составе аппарата все основные научные приборы для проведения комплексной программы исследований в районе вблизи 70° ю.ш., где уже в достаточной мере проявляются особенности полярной Луны. Можно напомнить, что на севере Земли аналогичную широту имеет

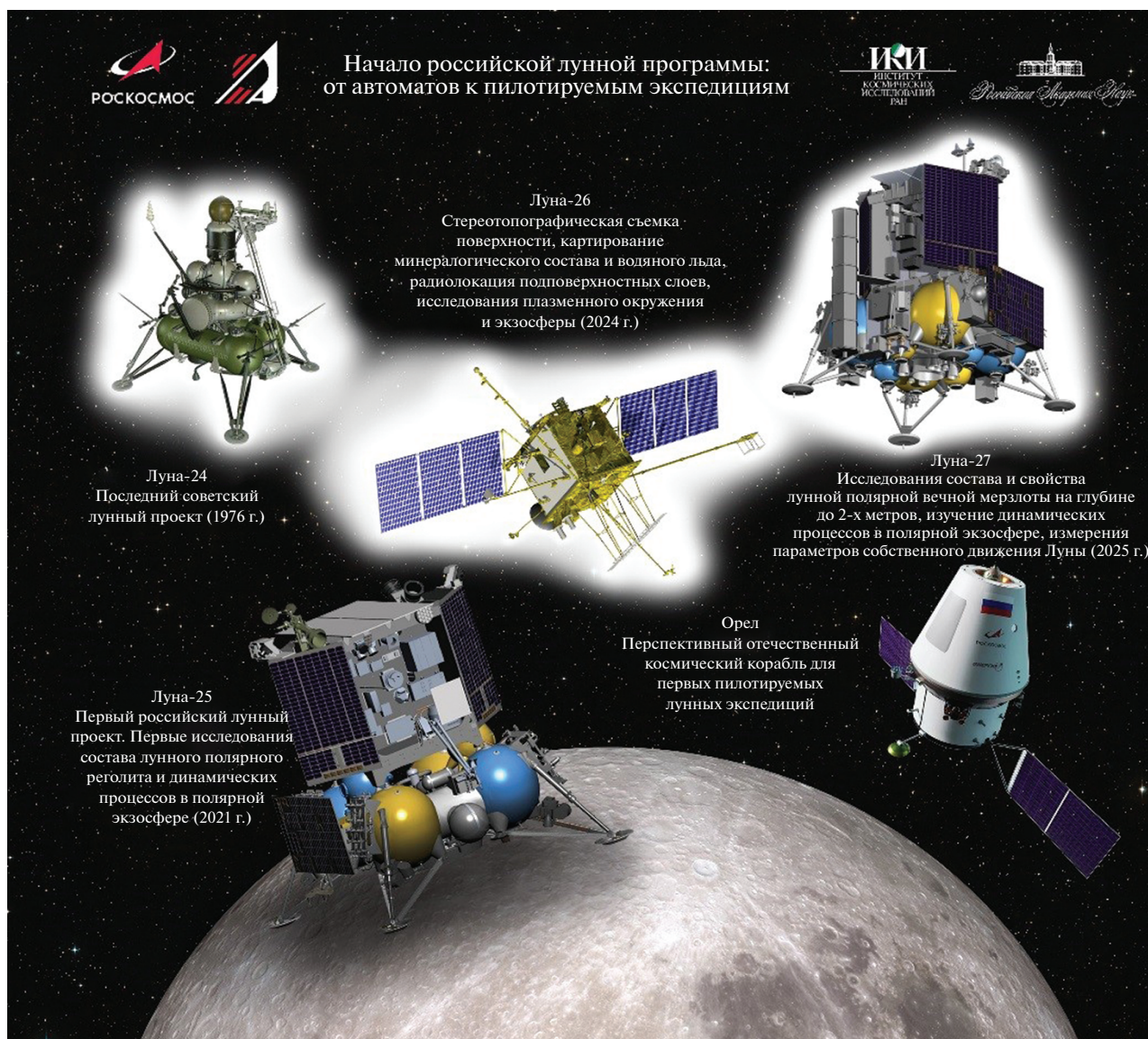


Рис. 1. Космические аппараты первого этапа российской лунной программы.

полярный город Норильск, а на юге вблизи такой широты расположена российская антарктическая станция “Новолазаревская”. Луна-25 должна стать первой в истории космонавтики лунной полярной миссией. Все предшествующие автоматические и пилотируемые миссии опускались на лунную поверхность в пределах 43° с.ш. и 45° ю.ш.

Основной и резервный районы посадки проекта Луна-25 были выбраны с учетом совокупности инженерных ограничений и научных предпочтений (рис. 2, 3) (Дьячкова и др., 2021).

Посадочный аппарат Луна-25 не имеет системы активного маневрирования на этапе посадки для высокоточного прицеливания и уклонения от препятствий, поэтому пригодный для посадки район должен быть достаточно большим. Это эл-

липс с главной осью 30 км вдоль линии меридиана и поперечной осью 15 км вдоль линии широты. Уклоны поверхности в пределах эллипса не должны превышать 15° для предотвращения опрокидывания аппарата при посадке, и сама поверхность в районе посадки должна быть достаточно гладкой (табл. 1). Приполярное расположение района посадки соответствует малым углам положения Солнца и Земли над горизонтом, поэтому условия освещенности поверхности и радиовидимости с Земли существенно зависят от видимой линии горизонта. Районы посадки также выбирались из условий продолжительности светлого времени лунных суток (так называемых “лунаций”) не менее 40% и интервала времени для радиовидимости с Земли не менее 50%. Среди всех

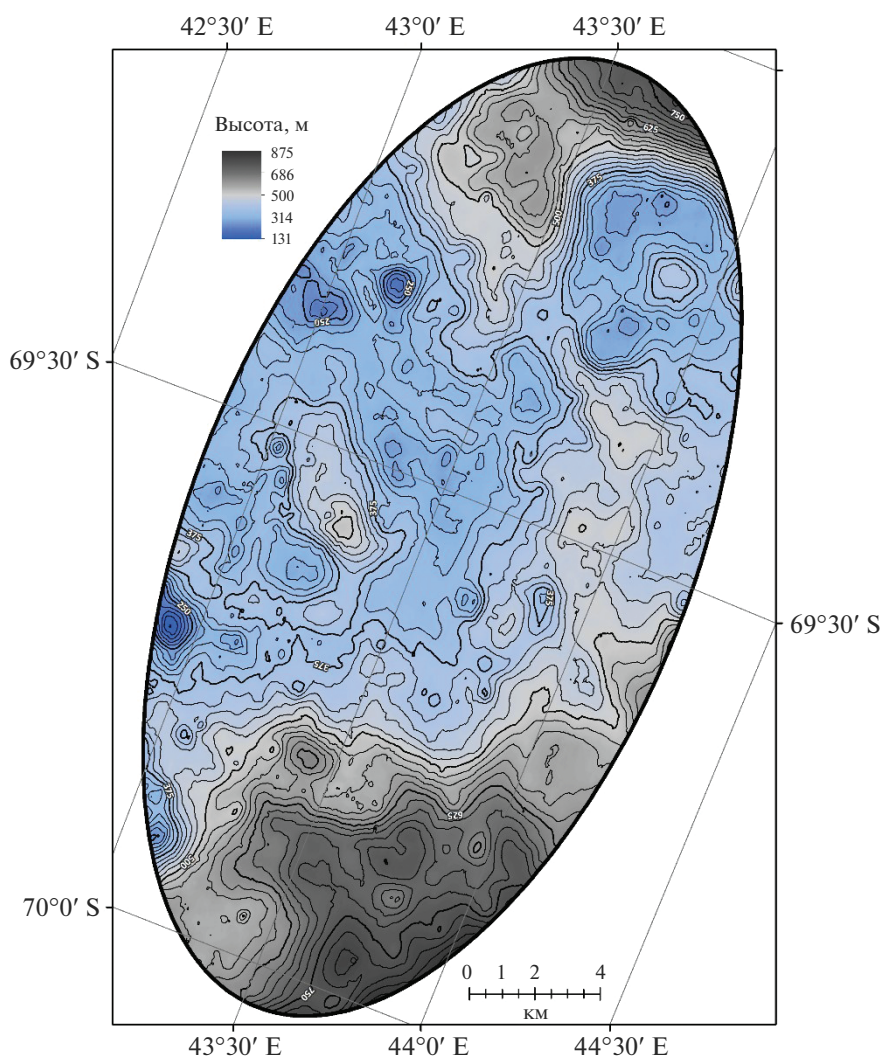


Рис. 2. Визуализация цифровой модели рельефа (ЦМР) LOLA DEM с разрешением 512 пикселей/градус в виде гипсометрической карты для выбранного основного района посадки. Серо-голубая шкала соответствует высоте места, изоуровни проведены через 25 м. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 22° в.д.

районов-кандидатов, удовлетворяющих указанным инженерным требованиям, были выбраны два, для которых оценки массовой доли воды в верхнем слое поверхности были максимальны и составляли около 0.5%. Эти оценки были получены на основе анализа данных нейтронного картографирования Луны с прибором ЛЕНД на борту лунного спутника NASA LRO.

НАУЧНАЯ АППАРАТУРА МИССИИ ЛУНА-25

Научные исследования на борту аппарата Луна-25 направлены на изучение свойств полярного реголита и полярной экзосферы Луны. Состав реголита в районе посадки будет изучаться в экспериментах с приборами ЛАЗМА-ЛР, ЛИС-ТВ-РПМ и АДРОН-ЛР (табл. 2). Первые два исследования будут обеспе-

Таблица 1. Характеристики основного и резервного районов посадки космического аппарата Луна-25

Районы посадки	Координаты центра района	Средняя продолжительность освещенного периода (% от периода лунации)	Доля поверхности с уклонами более 15° по ЦМР LOLADEM 60 м, %	Доля поверхности со склонами от 7° до 15° по ЦМР LOLADEM 60 м, %
Основной	69.55 ю.ш., 43.54 в.д.	45	0.09	7.37
Резервный	68.77 ю.ш., 21.21 в.д.	47	1.32	11.40

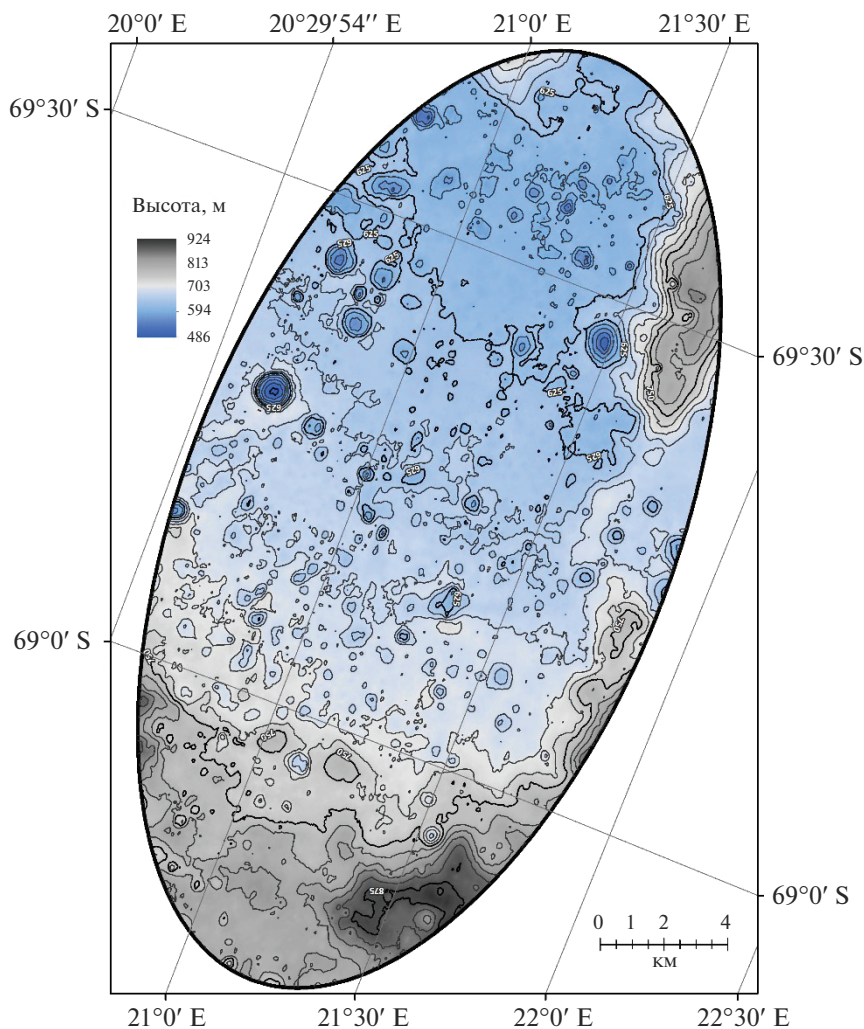


Рис. 3. Аналогично рис. 2 для запасного района посадки. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 0° в.д.

чены операциями Лунного Манипуляторного Комплекса (ЛМК) и наблюдениями телевизионного комплекса СТС-Л (табл. 2).

Прибор ЛАЗМА-ЛР является лазерным ионизационным масс-спектрометром для изучения элементного и изотопного состава лунного грунта (Чумиков и др., 2021). Образцы грунта в ячейки приемной карусели прибора будут доставляться грунтозаборным инструментом ЛМК. Всего может быть исследовано 11 образцов, масс-спектральный анализ одного образца потребует около 4 ч работы прибора ЛАЗМА-ЛР. Точность элементного анализа лунного вещества составит около 10%. Точность измерения относительной концентрации изотопов будет зависеть от величины изотопного соотношения и времени наблюдений. Наземные испытания показали, что за четыре часа наблюдений может быть достигнута точность около 1% для изотопов, находящихся в соотношении не более 10 : 1 (Чумиков и др., 2021).

Таким образом, измерения прибора ЛАЗМА-ЛР позволят сравнить состав южного полярного реголита с составом известных образцов, доставленных в ходе проектов Apollo и Луна из районов Луны на экваториальных и умеренных широтах.

Прибор ЛИС-ТВ-РПМ установлен непосредственно на ЛМК и предназначен для дистанционного исследования методами ИК-спектрии минералогического состава поверхности Луны по ИК-спектрам отражения в диапазоне 1.15–3.3 мкм и для изучения структуры поверхности реголита в видимом диапазоне (Манцевич и др., 2021). Наличие в веществе молекул воды и гидроксидов приводит к появлению спектральных линий, соответствующих длинам волн около 3 мкм. Поэтому данные измерений прибора ЛИС-ТВ-РПМ позволят экспериментально подтвердить присутствие молекул воды в веществе грунта в районе посадки аппарата Луна-25. Поскольку район посадки освещается Солнцем, его поверхность про-

Таблица 2. Состав комплекса научной аппаратуры проекта Луна-25

№ п/п	Название прибора	Задача
1	АДРОН-ЛР	Изучение элементного состава и содержания водорода в реголите методом активной нейтронной и гамма-спектроскопии
2	АРИЕС-Л	Изучение ионной и нейтральной экзосферы Луны, исследования взаимодействия солнечного ветра с поверхностью Луны и десорбции ионов из поверхностного слоя реголита
3	БУНИ	Коммутация электропитания и управление научной аппаратурой, сбор, хранение и передача телеметрической и научной информации в бортовые системы космического аппарата
4	ЛАЗМА-ЛР	Прямые измерения методом лазерной масс-спектрометрии химического, элементного и изотопного состава реголита
5	ЛИС-ТВ-РПМ	Изучение в видимом и инфракрасном диапазонах минералогического состава поверхностного слоя реголита Луны и содержания в нем воды
6	ПмЛ	Исследование физических характеристик лунной пылевой экзосферы и поверхностного реголита, рассеиваемого под действием микрометеоритных воздействий
7	ЛМК	Доставка образцов реголита в прибор ЛАЗМА-ЛР, изучение механических свойств реголита, наведение ЛИС-ТВ-РПМ на объекты вблизи КА
8	СТС-Л	Панорамная и стереосъемка. Съемка на посадке. Обеспечение работы ЛМК
9	Pilot-D	Съемка поверхности Луны с низкой окололунной орбиты и на этапе спуска

гревается солнечным излучением и не может содержать в своем составе свободный водяной лед. Однако под относительно тонким, около 10 см толщиной, верхним слоем реголита его температура остается достаточно низкой для присутствия в нем льда лунной “вечной мерзлоты”. Планируется, что ковш ЛМК сможет устранить верхний сухой слой, обнажить мерзлый грунт и направить на него прибор ЛИС-ТВ-РПМ. Можно ожидать, что в спектре ИК-излучения будут обнаружены линии, свидетельствующие о наличии молекул воды. Под воздействием солнечного излучения они должны сублимировать в экзосферу, и спектральные линии будут постепенно исчезать. Измерение переменности интенсивности линий позволит оценить начальную концентрацию молекул воды в слое “вечной мерзлоты” и темп их сублимации.

Прибор АДРОН-ЛР основан на применении ядерно-физического метода нейтронного каротажа лунного вещества в слое с толщиной от 60 см до 1 м непосредственно под аппаратом (Головин и др., 2021). Прибор включает импульсный нейтронный генератор, который излучает микросекундные импульсы нейтронного излучения с энергиями около 14 МэВ. Нейтроны проникают в лунное вещество на глубину около 1 м и взаимодействуют с ядрами основных породообразующих элементов и также с ядрами водорода в составе воды и других летучих соединений. В этих реакциях в лунном веществе генерируется гамма-излучение и происходит замедление нейтронов до надтепловых и тепловых энергий. Детекторы

прибора АДРОН-ЛР будут регистрировать вторичное гамма- и нейтронное излучение поверхности, возникающее после каждого импульса генератора. В энергетическом спектре гамма-лучей будут наблюдаться ядерные линии, которые указывают на присутствие ядер разных химических элементов. Анализ этих спектров позволит определить концентрацию основных химических элементов в веществе. Особый интерес вызывает регистрация спектральной линии гамма-лучей на энергии 2.2 МэВ. Это излучение возникает в реакции захвата тепловых нейтронов протоном (т.е. ядром водорода) с образованием возбужденного ядра дейтерия. Интенсивность линии излучения дейтерия зависит от концентрации ядер водорода, то есть — от массовой доли воды. Также детекторы прибора АДРОН-ЛР будут регистрировать послеимпульсное излучение нейтронов. Измерение продолжительности нейтронного послесвечения и соотношения потоков надтепловых и тепловых частиц позволит оценить массовую долю воды на разной глубине реголита. Таким образом, эксперимент с прибором АДРОН-ЛР предоставит возможность заглянуть вглубь лунной поверхности и оценить содержание воды в лунной “вечной мерзлоте”.

Научные приборы АРИЕС-Л (Вайсберг и др., 2021) и ПмЛ (Захаров и др., 2021) позволят впервые изучить полярную экзосферу в окрестности южного полюса Луны. Экзосфера — это разреженная лунная атмосфера, содержащая компоненты плазмы солнечного ветра, нейтральных атомов и левитирующих частиц лунной пыли.

Особенность приполярного района состоит в том, что потоки солнечного ветра и солнечного излучения распространяются практически по касательной к поверхности, причем направление их распространения смещается вместе с Солнцем с востока на запад в течение периода освещенности. Вследствие локального микрорельефа поверхности потоки плазмы и излучения с разных направлений могут по-разному взаимодействовать с реголитом и вызывать разные потоки частиц в окрестности посадочного аппарата. Прибор АРИЕС-Л будет регистрировать частицы с энергиями в диапазоне от 10 до 5000 эВ. Прибор ПмЛ способен измерять механический импульс (от $4.5 \times (10-12)$ Н с) и электрический заряд (от $1500 e^-$) пылевых частиц вблизи поверхности Луны, а также определять основные параметры плазмы по измерениям ее вольт-амперной характеристики с возможностью регистрации токов $>8 \times 10^{-11}$ А.

Аппарат Луна-25 имеет на борту систему технического зрения СТС-Л (Аванесов и др., 2021), включающую восемь ТВ-камер. Четыре камеры проведут съемки панорамы поверхности при различных условиях освещенности Солнцем. Эти данные позволят максимально точно определить координаты точки посадки на основе сопоставления изображений панорамы с численными моделями изображений, построенных на основе данных о лунном рельефе. Две камеры СТС-Л будут работать во время посадки аппарата. Изображения поверхности также позволяют определить координаты точки посадки на основе сопоставления съемок конкретных структур рельефа с данными численных моделей рельефа. Еще две камеры системы СТС-Л предназначены для построения стереоизображений рабочего поля ЛМК с северной стороны относительно корпуса посадочного аппарата. На основе данных этих измерений будет построена 3D-модель поверхности рабочего поля, с помощью которой будет выполняться наведение рабочих инструментов ЛМК для раскопки поверхности и забора образцов грунта, и также будет выполняться наведение прибора ЛИС-ТВ-РПМ в намеченный участок поверхности для измерений ИК-спектра отраженного излучения.

Дополнительно к системе СТС-Л в состав научной аппаратуры по просьбе ESA включена ТВ-камера Pilot-D. Эта аппаратура является опытным образцом оптической части перспективной европейской системы обеспечения высокоточной и безопасной посадки космического аппарата на лунную поверхность Pilot. Прибор Pilot-D и две посадочные камеры системы СТС-Л будут работать на участке ухода с эллиптической лунной орбиты 100 на 18 км и на участке вертикального спуска с высоты от 1500 м до касания лунной поверхности.

Работа всех научных приборов, кроме СТС-Л, будет обеспечиваться служебным прибором БУНИ (Ануфрейчик и др., 2021). Эта аппаратура обеспечивает электропитание приборов, подачу на них бортовых управляющих команд, считывание и хранение научной и служебной телеметрии. Применение специальной аппаратуры типа БУНИ в качестве интерфейса между научными приборами и системами космического аппарата является традиционным для отечественных научных аппаратов. Это позволяет проводить наземную экспериментальную отработку научной аппаратуры без участия систем космического аппарата, и аналогично, испытывать и отрабатывать бортовые служебные системы без установки на борт всего комплекса научных приборов. Аппаратура БУНИ также предоставляет сервис для выполнения научных измерений в автоматическом режиме — она обеспечивает хранение типовых циклограмм управления приборами и их использование в заданные моменты времени.

Головной научной организацией проекта является Институт космических исследований РАН. В создании комплекса научной аппаратуры, кроме ИКИ РАН, принимали участие Всероссийский институт автоматики им. Н.Л. Духова Госкорпорации «Росатом» (прибор АДРОН-ЛР), Университет Берна, Швейцария, (прибор ЛАЗ-МА-ЛР) и Европейское космическое агентство (прибор Pilot-D). В лабораторной отработке лунного манипуляторного комплекса (ЛМК) участвовали специалисты ГЕОХИ РАН им. В.И. Вернадского. Они подготовили для натуральных испытаний ЛМК аналог лунного грунта, созданный на основе изучения образцов реголита, доставленного в советских проектах Луна-16, Луна-20 и Луна-24.

ПЛАН РЕАЛИЗАЦИИ МИССИИ ЛУНА-25

Запуск космического аппарата Луна-25 будет произведен ракетой-носителем Союз-2.1б с космодрома Восточный. Вывод аппарата на орбиту перелета к Луне будет произведен разгонным блоком Фрегат. Перелет аппарата к Луне продлится около 4–5 сут, предполагается провести 2 коррекции траектории для обеспечения необходимой точности выхода на заданную окололунную круговую орбиту 100 на 100 км. Спустя несколько суток полета аппарата на окололунной орбите будет произведен маневр перехода на предпосадочную эллиптическую орбиту 100 на 18 км и произведена посадка.

Посадка должна произойти примерно в середине лунного дня за 9–10 земных дней до захода Солнца. За это время будет установлена радиосвязь с аппаратом, проведена проверка работоспособности всех бортовых систем аппарата и научных приборов и будет передан на Землю весь объем ТМ-информации, включающий данные

посадочных камер СТС-Л и Pilot-D за время посадки, данные панорамного изображения поверхности Луны, данные стереоизображения рабочего поля ЛМК, данные тестирования ЛМК и научной аппаратуры. Перед наступлением лунной полярной ночи аппарат будет переведен в спящий режим.

Лунная ночь продлится около 16 земных суток, после чего начнется вторая лунация миссии Луны-25. После перехода аппарата в активный дневной режим планируется провести первый сеанс исследований лунного полярного реголита. ЛМК проведет раскопку поверхности в заранее намеченном участке рабочего поля. После нескольких выемок грунта ковшом манипулятора на поверхности будет создана канава с размерами 6 см по ширине и 25 см по длине и с глубиной около 5 см. Грунтозаборный инструмент ЛМК войдет в грунт на дне канавы на глубину примерно 5 см, проведет забор грунта и доставит его в грунтозаборную ячейку карусели прибора ЛАЗМА-ЛР. После загрузки грунта в прибор начнется четырехчасовой цикл масс-спектрометрических измерений элементного и изотопного состава вещества (Литвак и др., 2021). Операции по раскопке канавы, забору грунта и доставке образца в прибор ЛАЗМА-ЛР будут сниматься стереокамерами СТС-Л и в реальном времени передаваться на Землю в группу управления наземного научного комплекса в ИКИ РАН. Операции ЛМК на борту космического аппарата будут дублироваться на натурном стенде ЛМК в ИКИ РАН. Все операции на Луне будут сопровождаться экспресс-анализом служебной и видеоинформации с борта.

Первая раскопка лунного полярного реголита станет “шагом в неизведанное” — при наземной отработке ЛМК было установлено, что прочностные свойства грунта-аналога лунного реголита существенно зависят от массовой доли водяного льда. Было экспериментально установлено, что уже при значениях массовой доли водяного льда в грунте около 1.5% создаваемые двигателями усилия на ковш ЛМК оказываются недостаточными для преодоления верхнего слоя и раскопки канавы с глубиной до 5–10 см. При отработках подобных ситуаций ЛМК на криогенном вакуумном стенде в ИКИ РАН были отработаны специальные алгоритмы движения ковша, которые позволяют преодолевать сопротивление поверхностного слоя (Литвак и др., 2021). Во время первого забора грунта экспресс-анализ данных служебной и видеоинформации с ЛМК позволит управлять его работой и оперативно изменять алгоритмы его движений.

После доставки добытого образца грунта в прибор ЛАЗМА-ЛР ЛМК проведет наведение прибора ЛИС-ТВ-РПМ на область раскопанного реголита. Это позволит измерить спектр ИК-из-

лучения вещества, ранее укрытого верхним слоем. Ожидается, что полученные данные позволят оценить первичную долю воды в приповерхностном слое реголита и проследить процесс ее сублимации. В дальнейшем планируется наводить ЛИС-ТВ-РПМ на область раскопанного реголита через каждые три часа для изучения процесса сублимации.

Утренний сеанс анализа лунного реголита прибором ЛАЗМА-ЛР станет основным экспериментом на борту аппарата Луна-25 во время второй или третьей лунации. После его завершения планируется начать программу исследований природных условий в районе посадки приборами АРИЕС-Л и ПмЛ. Эти приборы будут работать непрерывно в течение всего светлого периода лунации (кроме возможных технологических перерывов в связи с перегревом элементов конструкции космического аппарата). Данные измерений позволят проследить динамику процессов в лунной полярной экзосфере в зависимости от направления солнечного излучения и потока плазмы солнечного ветра.

Прибор АДРОН-ЛР также будет работать в пассивном режиме (без включения импульсного нейтронного генератора) и регистрировать собственное нейтронное и гамма-излучение поверхности Луны в точке посадки. Измеренный спектр гамма-излучения позволит оценить локальный радиационный фон. Также будет измерено гамма-излучения от трех естественных радиоактивных изотопов калия, тория и урана. Оценка их содержания в полярном грунте позволит провести сравнение с известными аналогичными значениями для грунта на умеренных широтах. Полученные данные необходимы для обработки данных активных измерений с работающим генератором.

Программа научных исследований в последующие лунации будет аналогична программе второй или третьей лунации. Для последующих измерений образцов лунного полярного реголита будут намечаться разные точки забора образцов в пределах рабочего поля и, в случае если это будет возможным, с разной глубиной раскопанной канавы (от нескольких см до 2–3 десятков см). В течение всей миссии планируется провести 11 заборов образцов грунта со всей поверхности рабочего поля ЛМК. Это позволит изучить переменность состава на локальных масштабах (порядка 10 см вдоль поверхности и от нескольких см до 30 см по глубине).

Теория предсказывает интересные и необычные пылевые явления на терминаторе — мощные скачки электростатического поля и “пылевые фонтаны”. Это связано с резким изменением зарядки лунной поверхности и пылинок солнечным УФ-излучением. Поэтому большой интерес будут представлять данные измерений приборов АРИЕС-Л и ПмЛ, полученные в условиях восхода и заката Солнца. Потоки солнечного ветра (кото-

рые тоже, но в меньшей степени, влияют на свойства пылевой экзосферы) и солнечного УФ-излучения в этих условиях будут быстро нарастать на восходе и ослабляться на закате. Это должно привести к быстрому изменению потоков частиц и распределения пылинок, регистрируемых этими приборами. Данные измерений позволят построить более точную динамическую модель приполярной экзосферы для конкретных особенностей рельефа в окрестности точки посадки для различных условий освещенности в зависимости от времени.

Завершение научной программы-минимум миссии Луна-25 можно связать с проведением измерений 11 образцов лунного реголита, которые позволяют сделать 11 ячеек на карусели прибора ЛАЗМА-ЛР. При проведении трех циклов таких измерений за третью, четвертую и пятую лунации, научная программа-минимум миссии может быть выполнена за полгода. На завершающем этапе выполнения программы будут выполнены несколько сеансов активного нейтронного зондирования верхнего слоя вещества поверхности импульсным нейтронным генератором прибора АДРОН-ЛР, что позволит оценить доли основных породообразующих элементов до глубины около 60 см и массовую долю воды в верхнем метровом слое. Детальный анализ временного профиля затухания после импульсного излучения нейтронов также позволит изучить степень неоднородности концентрации льда по глубине и проверить гипотезу о том, что массовая доля льда увеличивается с глубиной.

Заданный срок активного существования космического аппарата Луна-25 на лунной поверхности составляет 1 год. Поэтому после завершения программы-минимум научные исследования будут продолжены. 2022 год приходится на фазу нарастания очередного 25-го цикла солнечной активности. В это время можно ожидать генерации Солнцем большого числа вспышек и солнечных протонных событий. Работа приборов АДРОН-ЛР, АРИЕС-Л и ПмЛ в режиме непрерывного мониторинга позволит провести сравнительный анализ процессов в полярной экзосфере в условиях спокойного и активного Солнца. Также большим интересом представляет изучение плазменных процессов вблизи южного полюса во время регулярных прохождений Луны сквозь хвост земной магнитосферы. Если время активного существования космического аппарата составит более трех лет, то научные измерения на Луне-25 могут быть включены в комплексную программу измерений плазменных процессов в космическом окружении системы Земля–Луна на лунном спутнике Луна-26 и на околоземных космических аппаратах.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Несмотря на относительно небольшой состав научных приборов, программа исследований в рамках миссии Луна-25 сможет предоставить важные и приоритетные сведения о свойствах полярного вещества Луны и полярной экзосферы.

Впервые могут быть получены прямые оценки массовой доли лунной воды в реголите в районе посадки. Сопоставление этих оценок с данными орбитального картографирования позволит уточнить оценки водных ресурсов во всем южном полярном регионе. Измерения состава основных породообразующих и естественных радиоактивных элементов в южном полярном грунте позволят сравнить этот грунт с ранее доставленными образцами лунного вещества и оценить возможное влияние на этот грунт вещества, выброшенного из гигантского кратера Южный Полюс – Эйткен вблизи южного полюса на обратной стороне Луны.

Изучение динамических процессов в полярной экзосфере позволит впервые детально изучить процессы конденсации и сублимации молекул летучих соединений на затененной и освещенной поверхностях Луны и также эффекты левитации лунной пыли в течение лунных суток.

Измерения потоков гамма-лучей и нейтронов с лунной поверхности позволят оценить радиационную обстановку в районе посадки под воздействием галактических космических лучей и для условий спокойного и активного Солнца.

Все перечисленные результаты могут оказать существенное влияние на последующие проекты для исследования и освоения Луны как в автоматических миссиях, так и в составе пилотируемых экспедиций.

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам Научно-производственного объединения им. С.А. Лавочкина и смежных организаций, участвующим в разработке и создании космического комплекса Луна-25, за совместную работу по созданию, интеграции и испытаниям научной аппаратуры в составе аппарата и по отработке взаимодействия наземного комплекса управления и наземного научного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аванесов Г.А., Бережков А.В., Бессонов Р.В. и др. Службная телевизионная система КА Луна-25 // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 601–617.
- Вайсберг О.Л., Журавлев Р.Н., Моисеенко Д.А. и др. Широкоугольный ионный энерго-масс анализатор АРИЕС-Л // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 575–588.
- Галимов Э.М. Замыслы и просчеты: Фундаментальные космические исследования в России последнего двадцатилетия. Двадцать лет бесплодных усилий.

- С приложением: Отзывы на первое издание. Дискуссии. Комментарии. Изд. 2-е, доп. М.: УРСС, 2013.
- Головин Д.В. Прибор АДРОН для активной нейтронной и гамма-спектрометрии состава лунного вещества // *Астрон. вестн.* 2021. Т. 55. № 6. С. 542–549.
- Дьячкова М.В., Митрофанов И.Г., Санин А.Б. и др. Характеристика мест посадки космического аппарата Луна-25 // *Астрон. вестн.* 2021. Т. 55. № 6. С. 522–541.
- Захаров А.В., Дольников Г.Г., Кузнецов И.А. и др. Прибор ПМЛ на посадочном аппарате Луна-25: плазменно-пылевые измерения в приповерхностной экзосфере // *Астрон. вестн.* 2021. Т. 55. № 6. С. 589–600.
- Литвак М.Л., Козлова Т.О., Ильин А.Г. и др. Наземные функциональные испытания и физические калибровки лунного манипуляторного комплекса, предназначенного для российской лунной посадочной миссии Луна-25 // *Астрон. вестн.* 2021. Т. 55. № 6. С. 618–632.
- Луна — шаг к технологиям освоения Солнечной системы / Ред. Легостаев В.П., Лопота В.А. М.: РКК “Энергия”, 2011.
- Манцевич С.Н., Доброленский Ю.С., Евдокимова Н.А. и др. Лунный инфракрасный спектрометр с телевизионной поддержкой рабочего поля манипулятора (ЛИС-ТВ-РПМ) // *Астрон. вестн.* 2021. Т. 55. № 6. С. 550–561.
- Митрофанов И.Г. Поиск внеземной жизни в Солнечной системе: статус и перспективы // *Астрон. журн.* 2017. Т. 4 (94). С. 315–322.
<https://doi.org/10.7868/S0004629917040132>
- Циолковский К.Э. Вне Земли. Повесть. Калуга, 1920.
- Чумиков А.Е., Чепцов В.С., Манагадзе Н.Г., Манагадзе Г.Г. Лазерный ионизационный масс-спектрометр ЛАЗМА-ЛР на борту миссий Луна-25 и Луна-27 // *Астрон. вестн.* 2021. Т. 55. № 6. С. 562–574.
- Chin G., Brylow S., Foote M. et al. Lunar Reconnaissance Orbiter overview: The instrument suite and mission // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 129. P. 391–419.
<https://doi.org/10.1007/s11214-007-9153-y>
- Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // *Science.* 2010. V. 330 (6003). P. 463–468.
<https://doi.org/10.1126/science.1186986>
- Heldmann J.L., Colaprete A., Wooden D.H. et al. LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) observation campaign: Strategies, implementation, and lessons learned // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 167. P. 93–140.
<https://doi.org/10.1007/s11214-011-9759-y>
- Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B. et al. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: Evidence for water ice at the lunar poles // *Science.* 1998. V. 281 (5382). P. 1496–1500.
<https://doi.org/10.1126/science.281.5382.1496>
- Mitrofanov I.G., Bartels A., Bobrovnikskiy Y.I. et al. Lunar Exploration Neutron Detector for the NASA Lunar Reconnaissance Orbiter // *Space Sci. Rev.* 2010a. V. 150. P. 183–207.
<https://doi.org/10.1007/s11214-009-9608-4>
- Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V. et al. Hydrogen Mapping of the Lunar South Pole Using the LRO Neutron Detector Experiment LEND // *Science.* 2010b. V. 330 (6003). P. 483–486.
<https://doi.org/10.1126/science.1185696>
- Pieters C.M., Goswami J.N., Clark R.N. et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1 // *Science.* 2009. V. 326 (5952). P. 568–572.
<https://doi.org/10.1126/science.1178658>
- Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L. et al. Hydrogen distribution in the lunar polar regions // *Icarus.* 2017. V. 283. P. 20–30,
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.002>
- Sunshine J.M., Farnham T.L., Feaga L.M. et al. Space-based spectroscopic measurements provide evidence for water or hydroxyl (OH) on the surface of the Moon // *Science.* 2009. V. 326 (5952). P. 565–568.
<https://doi.org/10.1126/science.1179788>
- Vondrak R. Introduction to special section on Results of the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117.
<https://doi.org/10.1029/2012JE004298>