

УДК 520.6.07

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУНЫ АВТОМАТИЧЕСКИМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

© 2023 г. М. Я. Маров*

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

**marovmail@yandex.ru*

Поступила в редакцию 09.11.2021 г.

После доработки 01.09.2022 г.

Принята к публикации 13.09.2022 г.

Обсуждаются проблемы изучения и освоения Луны, представляющей первостепенный интерес для космогонии, планетологии и наук о Земле в контексте комплексного изучения Солнечной системы. Дан исторический обзор исследований Луны, основополагающий вклад в которые внесен советской лунной программой, выполненный при помощи автоматических аппаратов в первые десятилетия космической эры. Обзор приурочен к возрождению лунных исследований в рамках российской национальной космической программы. Рассматривается современное состояние знаний о Луне, в первую очередь ключевые вопросы о ее происхождении и ранней эволюции. Это имеет важнейшее значение для реконструкции основных процессов формирования всего семейства тел Солнечной системы, включая раннюю историю Земли, а также причины различных путей эволюции Земли и планет земной группы. На современном этапе актуальной задачей является освоение Луны как стратегического плацдарма на пути освоения человечеством космического пространства, создание элементов будущей лунной инфраструктуры с использованием местных природных ресурсов в потенциально наиболее востребованных полярных областях. Южный полюс является целью российских миссий *Луна-25* и *Луна-27* с обширной научной программой, которая призвана открыть многоцелевую программу с эффективным использованием робототехнических средств нового поколения. Эта программа предшествует российским планам пилотируемых полетов на Луну.

DOI: 10.31857/S0023420623010041, **EDN:** FHOVOZ

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых стратегических задач мировых космических держав в нынешнем столетии является детальное изучение и освоение Луны, опирающиеся на автоматические космические аппараты-роботы и пилотируемые экспедиции, с целью создания обитаемых лунных баз и последующего развертывания комплексной лунной инфраструктуры.

За полвека космических исследований накоплены обширные знания о природе естественного спутника Земли — морфологии и свойствах поверхности, происхождении и составе слагающих пород, окололунном космическом пространстве. Однако многие проблемы, касающиеся происхождения системы Земля–Луна, внутреннего строения Луны, ранних этапов эволюции остаются нерешенными. Их предстоит изучать одновременно с решением многочисленных прикладных задач, непосредственно связанных с новым этапом пилотируемых полетов на Луну и первыми шагами на длительном пути ее освоения с использованием местных сырьевых ресурсов.

Освоение Луны следует рассматривать как важнейший очередной шаг в развитии космонавтики, обещающий к тому же огромный политический и экономический эффект. О таких планах сообщают ведущие космические агентства. Наиболее амбициозными являются лунные стратегические цели США и Китая, предусматривающие начало освоения Луны с середины 2020-х гг. Американцы планируют вернуться на Луну спустя почти столетия после завершения программы *Apollo*, на этот раз мотивируемые не целями компенсировать политический ущерб от запуска первого советского ИСЗ и полета Юрия Гагарина, а намерением начать долговременную программу освоения Луны, что также имеет немаловажную политическую составляющую. Решать эту амбициозную задачу призвана объявленная НАСА программа *ARTEMIS*, включающая в себя тяжелую ракету (*SLS*) и лунный космический корабль *Orion*, с высадкой первой экспедиции на Луну предположительно в 2025 г. и последующим наращиванием полетов. Уже в этом десятилетии предусматривается осуществить несколько десятков запусков с Земли на Луну включая запуски

малых космических аппаратов на ретроградные лунные орбиты по программе *CAPSTONE*, автоматические посадочные аппараты с бурением, пять посадок с экипажем на поверхность Луны и создание первой лунной базы, а также начало разработки лунных ресурсов с участием частных компаний. Фактически это сигнал к запуску новой лунной гонки — на этот раз за создание средств постоянного присутствия на Луне. Луна и астероиды могут стать в перспективе важными источниками внеземного вещества для восполнения истощаемых запасов ряда полезных ископаемых на Земле.

Советский Союз внес основополагающий вклад в исследования космического пространства, запустив первый искусственный спутник Земли, первого человека в космос, положив начало полетам к Луне и планетам Солнечной системы, добившись многих выдающихся научных результатов [1]. На современном этапе Россия должна занимать подобающее ей достойное место в космосе, в том числе, не оставаться в стороне от амбициозных лунных планов США, Европы, Китая, четко обозначив свои намерения присутствия на Луне уже в ближайшей перспективе. Эта стратегическая задача отражена в разработанной Концепции Российской комплексной программы исследования и освоения Луны, включающей перспективы исследования и использования лунных ресурсов с учетом практически неограниченного источника солнечной энергии на поверхности Луны. Она была рассмотрена в ноябре 2018 г. на совместном заседании Научно-технического совета Роскосмоса и Совета по космосу РАН и утверждена их совместным решением.

При выборе основных элементов рациональной программы освоения Луны Россия может опираться на имеющиеся конкурентные возможности в создании космических автоматов-роботов, разработке тяжелых ракет-носителей, развитии средств межорбитальной транспортировки и создании нескольких поколений пилотируемых станций. Следует при этом учитывать существующие технологические и экономические ограничения, потребные ресурсы и большие финансовые вложения, необходимые для длительного поддержания и развития такой программы.

Максимальное использование робототехнических средств с широким внедрением искусственного интеллекта рассматривается нами как технически и экономически наиболее приемлемая стратегия отечественной лунной программы. Такой подход служит альтернативой американской концепции с опорой на пилотируемые экспедиции. На первом этапе ключевым элементом в региональном изучении и выборе перспективных районов будущего освоения Луны должна быть геологоразведка, с постепенным наращиванием

программ исследований, для чего использование автоматов наиболее рационально. Исходя из этой концепции, участие космонавтов должно сводиться, в основном, к завершению строительно-монтажных и наладочных работ, проводимых робототехническими средствами на месте развертывания будущей лунной базы.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ЭКСКУРС

Исторически Луна, как ближайшее к Земле космическое тело, была наиболее полно исследована астрономами. Однако в детальном изучении свойств Луны и окололунного пространства определяющую роль сыграли полеты космических аппаратов.

Советский Союз первым начал полеты к Луне и добился выдающихся успехов, среди которых: фотографирование обратной стороны Луны, первая мягкая посадка на Луну, первый искусственный спутник Луны, автоматический забор и доставка на Землю образцов лунных пород, создание и длительное функционирование на лунной поверхности самодвижущихся аппаратов-роверов. Советские лунные космические аппараты можно разделить на семейства согласно их эволюции: от самых первых простых аппаратов для демонстрационных полетов с попаданием в Луну и ее облетом в 1958–1959 годах (аппараты серии *E-1 Луна-1–Луна-3*), первых модульных конструкций для мягкой посадки, кульминацией которых стали *Луна-9* и *Луна-13*, искусственных спутников Луны (*Луна-10 – Луна-12*) и до завершающей серии сложных автоматических станций для взятия проб грунта с доставкой на Землю и высадки луноходов (*Луна-15 – Луна-24*) с целью поддержки планировавшейся пилотируемой посадки на Луну. Благодаря модульной конструкции комплектовать эти модификации можно было сравнительно просто и быстро. Несмотря на сложность поставленных задач, они обеспечили доставку как первых образцов внеземного вещества, так и первых луноходов, а также создание двух орбитальных аппаратов.

Серия E-1 – E-3. Аппараты серии *E-1*, созданные в ОКБ-1 С.П. Королева, были небольшими с ограниченным составом научной аппаратуры. Они представляли собой простую конструкцию сферической формы, похожую на первый ИСЗ, с системой стабилизации вращением и несколькими антеннами (рис. 1). Шесть таких станций были запущены в течение 12 месяцев, в промежутке между сентябрем 1958 и сентябрем 1959 гг. Все они, кроме двух, были потеряны из-за неполадок с ракетами-носителями, кроме *Луны-1* и *Луны-2*. И хотя 4.I.1959 *Луна-1* не попала собственно в Луну, это был первый космический аппарат, достигший второй космической скорости — за два месяца до американского *Pioneer-4*. Кроме того, на

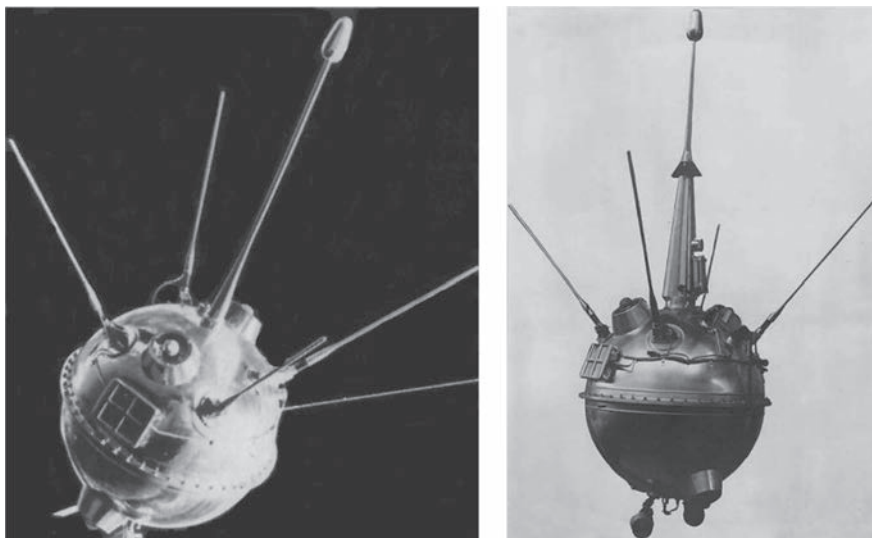


Рис. 1. Луна-1,-2 (РКК “Энергия”).

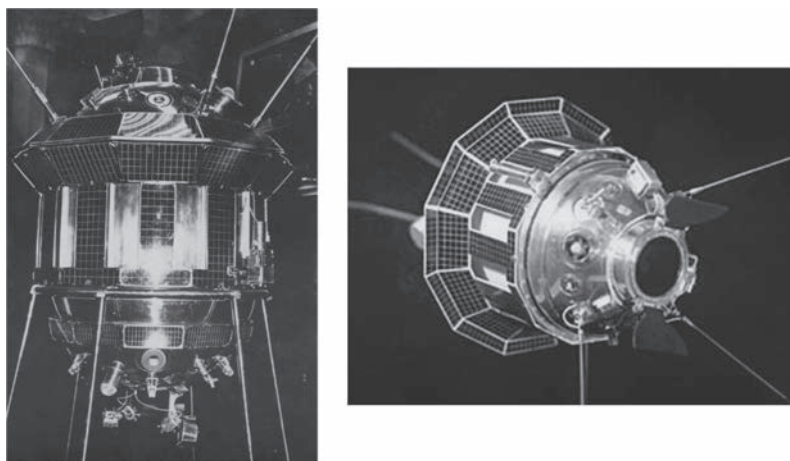


Рис. 2. Луна-3 (РКК “Энергия”).

Луна-1 впервые был экспериментально обнаружен солнечный ветер и измерена его сила. *Луна-2* впервые 14.IX.1959 совершила соударение с Лунной. Сам факт достижения Луны имел громадный эффект. Американцы восемь раз безуспешно пытались достигнуть Луны в 1958–1960 гг. Лишь один космический корабль, *Pioneer-4*, успешно стартовал с Земли и достиг второй космической скорости, но сильно отклонился от цели, пролетев мимо Луны.

В период 1959–1960 гг. были созданы лунные аппараты серий *E-2* и *E-3* (рис. 2). Они представляли собой второе поколение простых одномодульных конструкций с большей полезной нагрузкой [2]. В отличие от первых прямых запусков к Луне, они сначала выводились на сильно вытянутую эллиптическую орбиту, которая позволяла

облететь Луну с обратной стороны и ее сфотографировать, а оказавшись в зоне прямой видимости с Землей, передать полученные изображения. *E-2* была первой космической станцией, стабилизированной по всем трем осям для обеспечения фотосъемки Луны. В свою очередь, станция *E-3* была снабжена модифицированной системой ориентации и усовершенствованной фотокамерой. В период с начала октября 1959 г. и до конца апреля 1960 г. с помощью модифицированной ракеты-носителя *P-7* были запущены одна станция *E-2* и две станции *E-3*, которые, однако, были потеряны в результате аварий ракет-носителей. Успешно завершился полет еще одной станции *E-2*, ставшей *Луной-3* и передавшей первые снимки обратной стороны Луны [2], что стало настоящим триумфом советской космической программы (рис. 2).

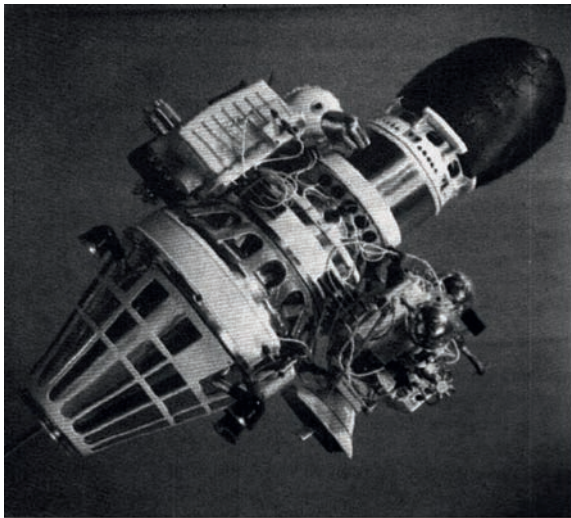


Рис. 3. Луна-9 (РКК “Энергия” и НПО Лавочкина).

Серия Е-6. Следующей задачей стала мягкая посадка на Луну, которая потребовала много усилий. В самом начале 1960-х создавались посадочный аппарат *Е-4* и орбитальный аппарат *Е-5*, но их быстро вытеснили более совершенные аппараты серии *Е-6*, также разработанные в ОКБ-1. Аппарат *Е-6* представлял собой модульную конструкцию, на которую можно было монтировать спускаемый или орбитальный аппарат. Их летные испытания продолжались с января 1963 по декабрь 1965 года, но ни в одном из одиннадцати запусков осуществить мягкую посадку на Луну не удалось.

Ситуация резко изменилась после передачи лунно-планетной тематики вместе с технической документацией и результатами экспериментальной отработки из ОКБ Королева во вновь созданное на базе легендарного авиационного КБ С.А. Лавочкина и завода 301 НПО Лавочкина. Его возглавил талантливый инженер, настоящий энтузиаст космических исследований Г.Н. Бабакин. За небывало короткий срок коллективом Г.Н. Бабакина было создано нескольких новых поколений автоматических космических аппаратов (полтора десятка за 6 лет!), что в нынешних условиях, при неизмеримо разросшейся бюрократии, представляется совершенно невероятным. История создания, конструкция этих лунно-планетных аппаратов и полученные результаты подробно изложены в работах [3, 4]. НПО Лавочкина провело ряд модификаций аппарата *Е-6* (ставшего *Е-6М*) и было немедленно вознаграждено успешным полетом *Луны-9* (рис. 3), которая 3.10.1966 совершила первую в мире мягкую посадку на Луну и передала на Землю панораму ее поверхности (рис. 4). Одновременно было доказано, что поверхность Луны достаточно твердая, а

не покрыта рыхлым пылевым слоем, в который мог бы провалиться посадочный аппарат. За *Луной-9* последовала *Луна-13*. Всего за 14 месяцев было создано также несколько версий орбитальных аппаратов и достигнуто рекордное число успешных миссий: шесть из десяти запусков *Е-6М*. После всего лишь одного неудачного испытательного запуска первой модели *Е-6С* на орбиту вокруг Луны вышел аппарат *Луна-10*, оснащенный приборами для исследования полей и частиц на окололунной орбите (рис. 5). В дальнейшем КА был доработан для решения задач орбитальной фотосъемки по программе *Е-6ЛФ*. Запуски аппаратов *Луна-11* и *Луна-12* также увенчались успехом, хотя в первом случае качественных изображений получить не удалось. Наконец, после еще одной модификации появился аппарат *Е-6ЛС*, и вслед за двумя его неудачными запусками последовал успешный полет орбитального аппарата *Луна-14*.

Аппараты 7К-Л1 “Зонд”. 1960-е годы прошлого столетия отмечены беспрецедентной лунной гонкой — острым соперничеством СССР и США за высадку человека на Луну. К великому сожалению, несмотря на огромные усилия и затраты, нам не удалось осуществить программу *Н1-Л3*, преследовавшую эту цель, и составить конкуренцию США с их программой *Apollo*. Случилось это по целому ряду причин, наиболее объективный анализ которых дан в книге “Ракеты и люди” [3].

Идея полета человека на Луну вынашивалась С.П. Королевым уже после запуска первых “лунников”, для чего вскоре начала создаваться трехмодульная конструкция корабля *Союз*. Она состояла из модуля поддержки, включающего в себя энергоресурсы, силовую установку, системы связи, навигации, и расходные материалы для

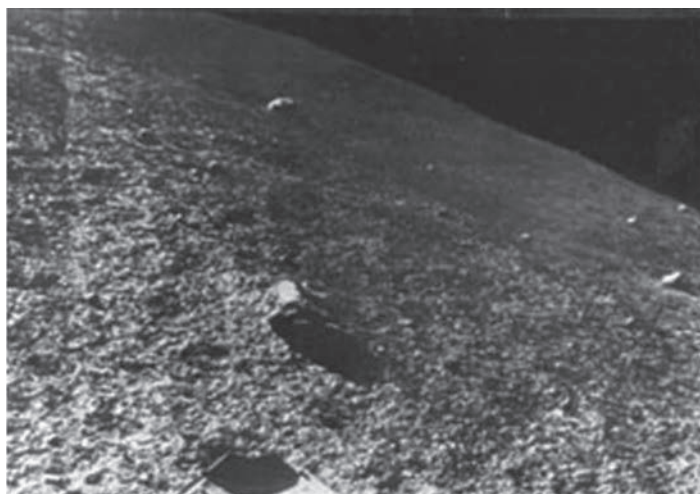


Рис. 4. Первая панорама лунной поверхности. *Луна-9*, 1966.

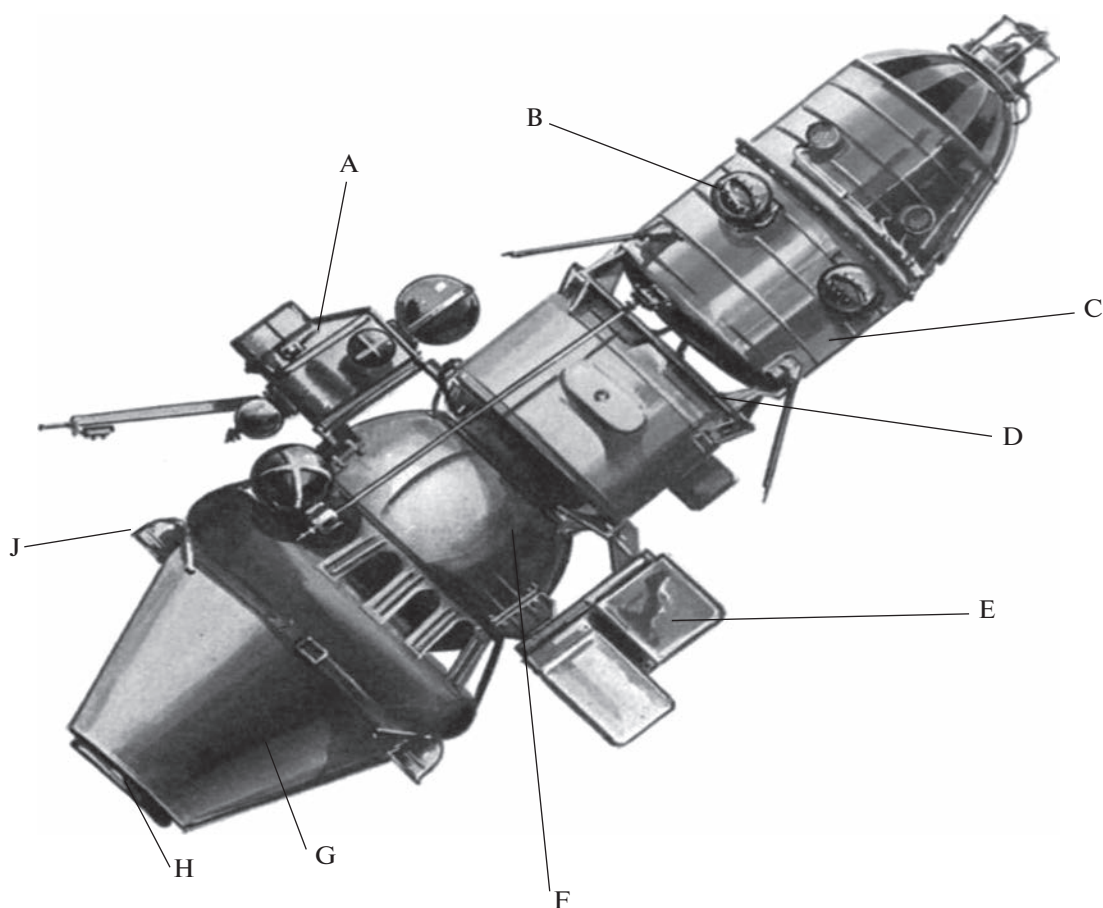


Рис. 5. *Луна-10* (НПО Лавочкина).

космонавтов; посадочного модуля для доставки космонавтов на орбиту и возвращения на Землю; а также обитаемый отсек большого объема с системами жизнеобеспечения, пригодный для длительного полета. В середине 1960-х эти космиче-

ские корабли пришли на смену обитаемым капсулам *Восток* и *Восход*, они пошли в серию, вполне надежны и до сих пор находятся в эксплуатации.

На основе *Союза* была создана орбитальная станция *7К-ЛОК (Л1)*, предназначенная для вы-



Рис. 6. Лунный орбитальный корабль (ЛОК) (РКК “Энергия”).

полнения операций на окололунной орбите. Идея всего проекта состояла в том, чтобы вывести на окололунную орбиту тяжелой ракетой *Н-1* орбитальный модуль *7К-ЛОК* вместе с посадочным модулем *ЛК* (комплекс *Н-1 ЛЗ*). Предполагалось кроме того, что *ЛОК*, выводимый к Луне мощным четырехступенчатым *Протоном*, совершит полет по окололунной орбите с двумя космонавтами на борту, как предшественник для подготовки посадки на Луну одного космонавта в совместном полете *ЛОК-ЛК* с использованием *Н-1* (рис. 6). *ЛК* успешно испытывался в автоматическом режиме при полетах на околоземной орбите.

Для подготовки пилотируемых окололунных полетов было произведено несколько запусков в автоматическом режиме *7К-ЛОК*, получивших название *Зонд*: первые два - на околоземной орбите, и девять других (в течение 1967–1970 гг.) — на характерное для лунных полетов расстояние, либо непосредственно по реальной окололунной орбите. Так, вернувшийся на Землю *Зонд-4* для простоты навигации совершил полет на лунную дистанцию, но в стороне от Луны, а аппараты *Зонд-5–Зонд-8* совершили полеты по окололунной орбите. *Зонд-4* разрушился при входе в атмосферу, у *Зонда-5* возникли значительные — но не фатальные — проблемы с бортовыми системами, а *Зонд-6* разбился при посадке за несколько недель до полета *Apollo-8*.

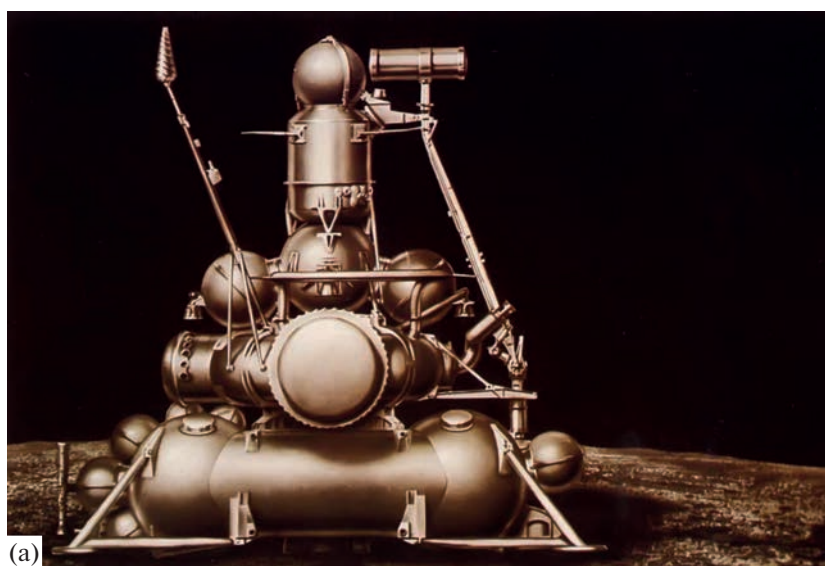
Серия *E-8*. Лунная гонка с американцами была нами проиграна. Мы смогли, однако, противопоставить соперникам запуски нового поколения космических аппаратов серии *E-8*, создание которых стало выдающимися техническими достижениями НПО Лавочкина [4, 5], осуществленными, к тому же, с минимальными затратами, несопоставимыми с программой *Apollo*.

Станции *E-8-5* для забора грунта. Базовый аппарат *E-8* изначально создавался под луноход, разработка которого была начата еще в королев-

ском ОКБ-1 для поддержки лунной пилотируемой экспедиции, а когда стало ясно, что мы ее осуществить не сможем, конструкция была срочно модифицирована — уже в НПО Лавочкина — в самоходный автоматический аппарат и одновременно в космическую станцию *E-8-5* для автоматического забора и доставки на Землю образцов лунного грунта с целью опередить высадку американских астронавтов на Луну и тем самым уменьшить международный резонанс от этого достижения.

Лунные аппараты серии *E-8* [4, 5] были гораздо тяжелее и сложнее, поэтому для их запуска требовалась мощная ракета-носитель *Протон*. Особенно сложные задачи встали перед разработчиками *E-8-5*. Сегодня, оглядываясь назад, следует подчеркнуть, что сам факт создания этих уникальных космических станций в столь короткие сроки и с высоким уровнем совершенства просто поразителен, как и умение россиян “просто сделать это”, забыв о трудностях, максимально использовать “то, что есть под рукой”, и способность решать многие вопросы буквально на ходу, во время, а порой и после монтажа.

Из одиннадцати запущенных станций *E-8-5* успешными оказались *Луна-16*, *Луна-20* и *Луна-24*, причем *Луна-20* и *Луна-24* фактически представляли собой усовершенствованную модель *E-8-5М* (рис. 7). Из трех запусков космических аппаратов *E-8* успешными были *Луна-17* и *Луна-21* (*Луноход-1* и *Луноход-2*). Две дополнительные модели орбитальных аппаратов *E-8* были доработаны до *E-8ЛС* и совершили успешные полеты, известные как *Луна-19* и *Луна-22*. Поэтому окончательный послужной список аппаратов *E-8* включает семь успешных полетов из шестнадцати. Особенно досадной была неудача с запуском *Луны-15*, запущенной 13.VII.1969, всего за 3 дня до *Apollo-11*, который 17.VII вышел на окололунную орбиту. Было проведено несколько коррекций орбиты *Луны-15*,



(a)



(б)



(в)

Рис. 7. Луна-16; а, б, в (НПО Лавочкина).

чтобы осуществить посадку в Море Спокойствия, но предположительно была недооценена роль лунных масконов, которые вызвали ряд проблем с контролем высоты. В результате маневр спуска не удался, и *Луна-15* разбилась, а на Луну первыми высадились американцы на *Apollo 11*.

Причина неудачи с *Луной-15* остается до сих пор до конца невыясненной.

Модификация базового аппарата *E-8* в космическую станцию *E-8-5* поставила разработчиков перед сложнейшими проблемами, в первую очередь, из-за ограничений на массу КА, которому предстояло взлететь с Луны и вернуться на Землю. Снабдить аппарат сложной и тяжелой систе-

мой управления, какой оснащались другие межпланетные космические станции, чтобы определять собственные координаты и осуществлять маневры коррекции курса на промежуточном участке траектории, оказалось невозможным. Было найдено оригинальное решение пассивного возврата аппарата с Луны на Землю путем выбора из небольшого набора траекторий таких, которые не требовали коррекции курса на промежуточном участке полета (рис. 76). Эти траектории были ограничены особой областью на Луне, геометрическое место точек на которой варьировалось в зависимости от времени года и момента старта при ограничениях на точность знания парамет-

ров лунного гравитационного поля и определение района посадки на Землю возвращаемой капсулы с грунтом (рис. 7в). С учетом большой погрешности вычисления эллиптической траектории задача обнаружения и поиска капсулы оказывалась чрезвычайно сложной даже при наличии радиомаяка. Тем не менее, даже в этом случае потребовались усилия, чтобы повысить грузоподъемность *Протона* примерно на 150 кг и обеспечить запуск космической станции.

Конструктивно посадочные модули аппаратов *Е-8* и *Е-8-5* и циклограммы их посадки на Луну были аналогичны, но сильно отличались от серии *Е-6* [4, 5]. Оба модуля были центрированы относительно четырех сферических топливных баков, соединенных друг с другом цилиндрическими секциями. Система посадки и двигатель монтировались снизу этой конструкции, а полезная нагрузка — сверху. Основное различие состояло в том, что аппарат *Е-8-5* был оснащен системой забора лунных образцов, парой телекамер для стереосъемки места забора и прожекторами для случая ночной посадки. Пандусы для съезда лунохода были заменены на тороидальный герметичный отсек, в котором находились система управления и приборы для операций на поверхности. Взлетная ракета была смонтирована наверху, а сам посадочный аппарат и его тороидальный отсек играли роль стартовой площадки (рис. 7а). Сферическая возвращаемая капсула была прикреплена к верхней части возвратной ракеты с двигателем тягой 18,8 кН, работавшим 53 с и сообщавшим космическому аппарату скорость 2,7 км/с, что обеспечивало взлет с поверхности Луны и выход на траекторию прямого попадания на Землю. Капсула (рис. 7в) представляла собой сферу диаметром 50 см и весом 39 кг, покрытую абляционным материалом для входа в атмосферу Земли на скорости около 11 км/с. Она состояла из трех секций: в верхней находился парашют площадью 10 кв. м и антенны радиомаяка, в средней — образцы лунного грунта, а в нижней — аккумуляторы и передатчики. Распределение массы обеспечивало аэродинамическую стабилизацию капсулы при входе в атмосферу.

Система забора лунных образцов (рис. 7а) состояла из подъемной штанги длиной 90 см с бурильным устройством на конце, которая могла осуществлять поступательные и вращательные движения для операций на лунной поверхности и для переноса образцов в возвратную ракету через боковой люк возвратной капсулы. Ее масса составляла 13,6 кг. Головка герметичного и термоизолированного бура длиной 417 мм и диаметром 26 мм с механизмом для ударно-вращательных движений представляла собой коронку с острыми зубцами, что позволяло осуществлять сверление как твердого, так и мягкого грунта. При скорости

500 об/мин требовалось 30 мин, чтобы заполнить внутреннюю часть бура длиной 38 см.

Эта конструкция великолепно сработала при запуске *Луны-16*, спустя более года после *Луны-15* и пяти промежуточных аварийных запусков по вине ракеты-носителя *Протон-К*. *Луна-16* доставила 101 грамм лунного вещества, и этот успех стал настоящим триумфом советской космической программы, продемонстрировавший колоссальные возможности космических роботов. Это подтвердили еще два успешных запуска аппаратов *Е-8-5М* (*Луна-20* и *Луна-24*), причем на *Луне-24* использовалась усовершенствованная буровая установка, способная проникать под поверхность Луны на глубину 2,5 м и при этом сохранять стратификацию залегания взятых образцов [4, 5].

Луна-24 стала последней космической станцией серии *Луна*, завершившей советскую лунную программу. Был изготовлен третий луноход, была создана еще одна космическая станция для доставки образцов лунного грунта, но в 1977 г. ракета-носитель, предназначавшаяся вначале для лунохода, была использована для запуска спутника связи, к тому же внимание переключилось с Луны на проект *5М* по доставке образцов пород с Марса. Позднее все лунные и марсианские программы были принесены в жертву успешным исследованиям Венеры. Тем не менее, надежная лунная ступень *Е-8* была модифицирована, и на ее основе создана автономная двигательная установка для космической станции *Фобос* 1988 года. А в дальнейшем она стала использоваться в качестве универсального разгонного блока *Фрегат* в составе ракет-носителей среднего и тяжелого классов *Союз-ФГ*, *Союз-2*, *Союз-3*, *Зенит-3SLБФ*, *Ангара-А3*.

Запуски автоматических станций *Луна-16*, *Луна-20* и *Луна-24* позволили получить выдающиеся научные результаты исследований вещества лунных пород из разных районов Луны в земных лабораториях (рис. 8). Грунт, взятый *Луной-16* в Море Изобилия, представлял собой изверженные магматические породы — темный порошкообразный морской базальт, аналогичный полученному *Apollo-12* в Океане Бурь. Образцы пород, доставленных *Луной-20* из горного района, оказались существенно отличными от морского грунта *Луны-16*. Они были гораздо светлее и содержали больше крупных частиц. Более половины вещества горных пород представляли собой анортозиты — древние горные породы семейства габброидов, состоящие в основном из полевого шпата. В двухметровой колонке лунного реголита, полученной *Луной-24* с сохранением стратификации пород, помимо отличий химического состава, были обнаружены напластования, явно указывающие на последовательность процессов их формирования. Методом диффузионной ИК-спек-

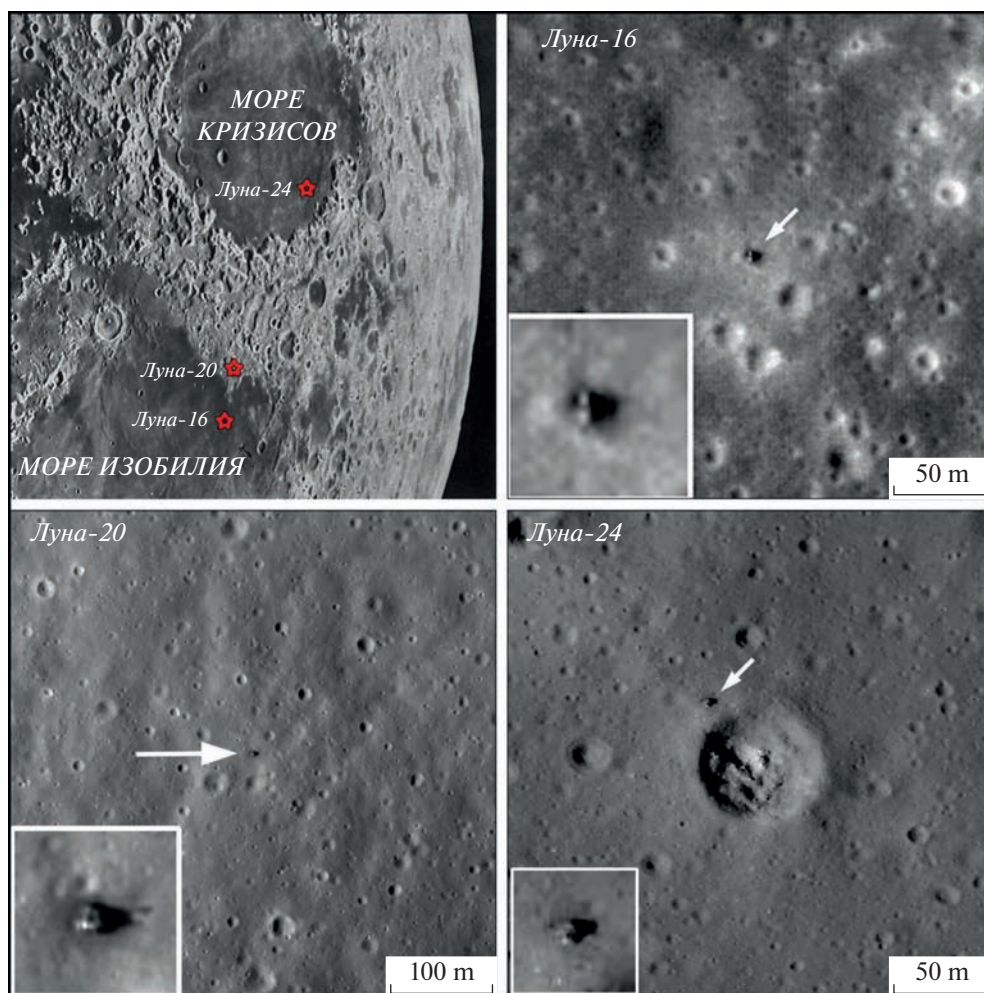


Рис. 8. Места посадок КА Луна-16, -20, -24 (Монтаж изображений LPO (NASA) А.Т. Базилевского).

троскопии в магматических породах морских базальтов было обнаружено заметное содержание воды ~ 0.1 вес. % [6]. Это, по существу, было одним из первых указаний на то, что Луна может быть не сухим, как считалось, а достаточно влажным телом, возможно со времени ее рождения (см. ниже). Изотопный анализ позволил провести датировку образцов и определить возраст лунных пород из горных и морских областей и лучше понять историю Луны. Наиболее полные космохимические исследования доставленного лунного вещества были проведены учеными Института геохимии и аналитической химии имени Вернадского (рис. 9) и одновременно образцы были переданы для физических и химических исследований целому ряду других организаций. Результаты исследований, продолжающихся до настоящего времени, были опубликованы в многочисленных изданиях. В 1971 году три грамма грунта, доставленного *Луной-16*, были обменены на три грамма грунта, взятого в ходе программы *Apollo 11* и три грамма грунта, взятого *Apollo 12*.

Два грамма вещества, полученного *Луной-20*, были обменены на один грамм горных пород, доставленных *Apollo 15*. Был проведен также обмен вещества из колонки *Луны-24* с образцами, доставленными другими экспедициями *Apollo*. Некоторые образцы были подарены советскими учеными лабораториям другим стран, в том числе Франции, Австрии и Чехословакии. Среди других результатов заслуживают внимание данные, полученные при помощи высотомеров в ходе спуска посадочных аппаратов, в частности *Луны-15*, которые позволили оценить среднюю плотность лунной поверхности.

Станции Е-8 - Луноходы. Конструкция луноходов была простой и эффективной. *Луноход-2* был усовершенствованной версией *Лунохода-1* и лучше оснащен научными приборами (рис. 10, 11). Каждый луноход представлял собой герметичный корпус из магниевого сплава, напоминающий по форме бадью, накрытую большой навесной крышкой. Внутри нее были размещены система управления, приборы и датчики для контроля

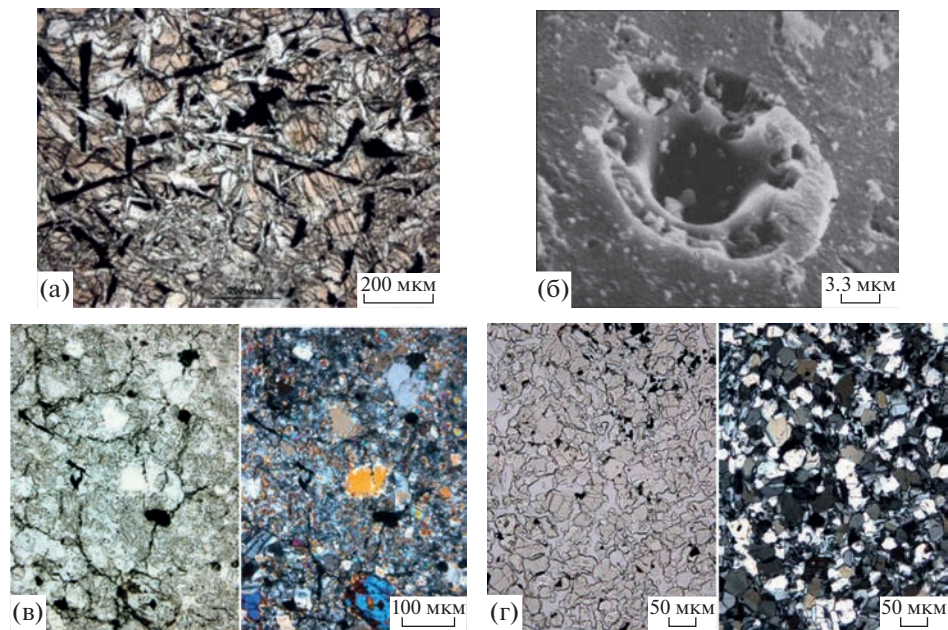


Рис. 9. Примеры структуры и состава лунного грунта, доставленного АМС *Луна-18*, -20, -24. Изображения, электронная микроскопия: а — фрагмент базальта, *Луна-16*; б — микрократер, *Луна-16*, в — гранулированная брекчия, *Луна-20*, г — фрагменты ферробазальта, *Луна-24*. Источник: ГЕОХИ РАН.

свойств окружающей среды. Масса *Лунохода-1* составляла 756 кг, а *Лунохода-2* — 836 кг, высота 135 см, длина 170 см, ширина в верхней части 215 см, а в нижней у колес 160 см, размер шасси 2.22×1.6 м. В дневное лунное время поворотная крышка открывалась, поднимаясь над задней частью лунохода для зарядки аккумуляторов от солнечных батарей, расположенных на внутренней поверхности крышки и вырабатывавших ~1 кВт мощности. Одновременно обеспечивалась работа системы терморегулирования за счет радиаторов, расположенных в верхней части корпуса. В ночное время лунных суток крышка закрывалась и работоспособность лунохода при окружающей температуре около -150°C поддерживалась за счет небольшого радиоизотопного источника массой 11 кг на основе полония-210 и радиатора наверху закрытой крышки. Корпус монтировался на шасси с восемью колесами диаметром 51 см из провололочной сетки, трущаяся поверхность которых была набрана из титановых лопаток. Каждое колесо оснащалось индивидуальной подвесной системой с использованием особой смазки для работы в вакууме, герметичными двигателями постоянного тока и независимым тормозом [4, 5].

Луноход управлялся с Земли командой из пяти человек, автоматический режим не предусматривался, а рулевое управление допускало независимое изменение скорости колес. Аппарат мог передвигаться, даже если функционировали всего по два колеса с каждой стороны, а каждый мост мог в случае блокировки отсоединяться от колеса.

Наименьший радиус поворота составлял 80 см. Ориентация определялась с помощью внутренних гироскопов. Луноход мог преодолевать препятствия высотой до 40 см и шириной до 60 см, взбираться по откосу до 20 градусов и маневрировать на откосах до 45 градусов. Аппарат оснащался устройствами для предотвращения перемещения по откосам с большим наклоном, гарантирующими устойчивость положения и безопасность. У *Лунохода-1* была всего одна скорость, 800 м/ч, с которой он мог двигаться либо вперед, либо назад, а *Луноход-2* мог двигаться в обоих направле-

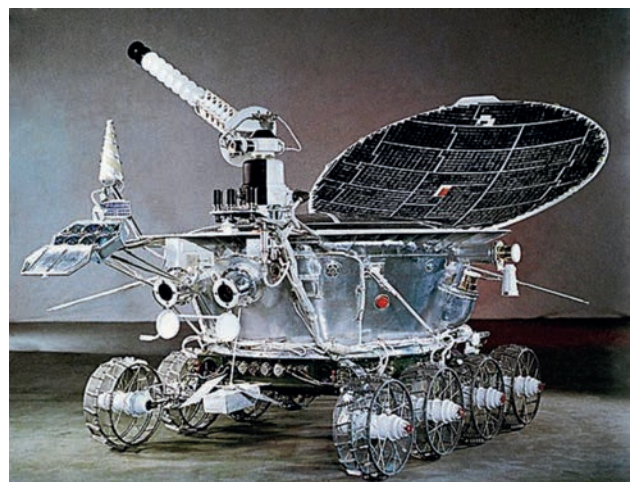


Рис. 10. *Луноход-1* (НПО Лавочкина).

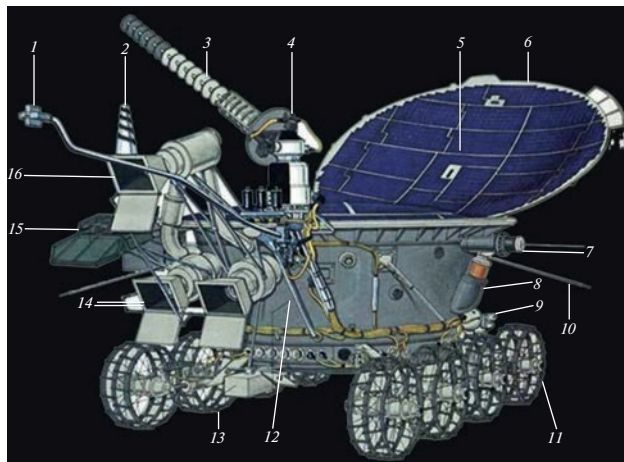


Рис. 11. *Луноход-2* (НПО Лавочкина).

ниях со скоростями 800 или 2000 м/ч. Экипаж управлял самоходным аппаратом с помощью пары телекамер, расположенных в передней части лунохода и снабженных иллюминаторами, которые передавали картинку с низким (250 строк по горизонтали) разрешением со скоростью 20 секунд на кадр у *Лунохода-1* и с гораздо большей скоростью, 3,2 с на кадр у *Лунохода-2*, который был оснащен дополнительной камерой. Обе пары камер совместно создавали 360-градусную панораму. Разрешение каждой 180-градусной панорамы составляло 500×3000 пикселей. На управлении сказывалась примерно пятисекундная задержка при передаче сигнала с Луны на Землю и обратно. По левому и правому борту лунохода были установлены четыре телефотометра, которые обеспечивали полный вертикальный панорам-

ный обзор, включая небо и звезды при наведении в зенит для целей навигации, и индикатор уровня положения лунохода относительно надира. Сзади к луноходу прикреплялось девятое штыревое колесо с одометром-спидометром для измерения скорости и расстояния. На пантографе был смонтирован пенетрометр (прибор ПРОП) для измерений физико-механических свойств лунной поверхности, а ее состав определялся рентгенофлуоресцентным спектрометром Рифма, что обеспечивало полноту данных геолого-геохимического анализа и свойств участков поверхности, видимых на панорамах. На обоих луноходах был установлен французский лазерный уголкового отражатель массой 3,5 кг, состоявший из четырнадцати 10-см силиконовых призм, с помощью которого проводились измерения расстояния от Земли до Луны с точностью до 3 м (*Луноход-1*) и 40 см (*Луноход-2*). Ландшафты лунной поверхности в области работы *Лунохода-1* показаны на рис. 12, а трасса передвижения *Лунохода-2* — на рис. 13.

Станция *Луна-17* с *Луноходом-1* совершила посадку в Море Дождей 17.XI.1970, а *Луна-21* с *Луноходом-2* внутри заполненного лавой кратера Лемонье, в Таврских горах на восточном берегу Моря Ясности 15.I.1973. Аппараты были рассчитаны на работу в течение трех лунных месяцев, однако в реальности первый луноход проработал на Луне почти год, а второй свыше 4-х месяцев. *Луноход-1* преодолел путь длиной 10540 метров и передал более 20000 изображений, 206 панорам, 25 рентгеновских измерений состава и более 500 физико-механических тестов грунта. На десятый лунный день его сфотографировали с орбиты астронавты *Apollo 15*. *Луноход-2* за меньшее время преодолел в четыре раза большее расстояние (37 км), включая

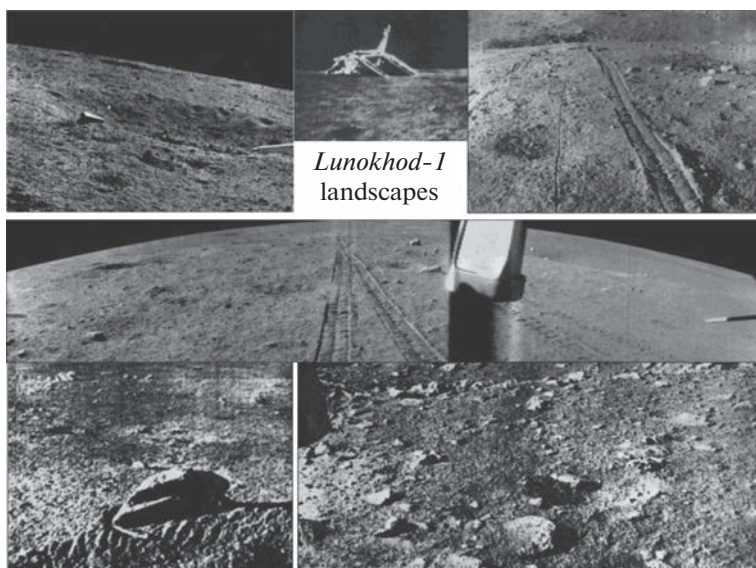


Рис. 12. Следы *Лунохода-1* (Монтаж изображений А.Т. Базилевского).

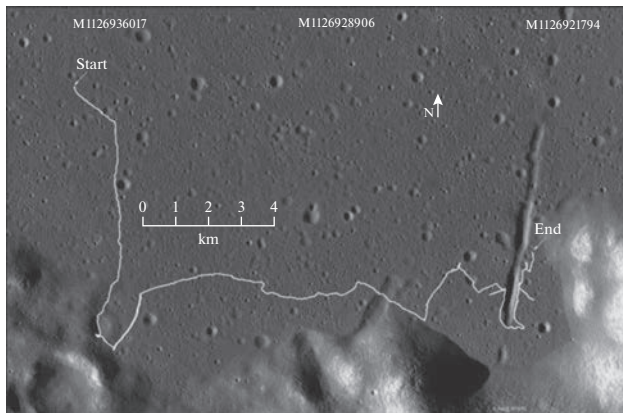


Рис. 13. Трасса *Лунохода-2* на поверхности Луны. Изображение района лунной поверхности — снимок *LRO, NASA*.

холмистые возвышенности и ложбины на поверхности Луны, передав более 80000 изображений и 86 панорам, результаты сотен анализов элементного состава и механических свойств грунта и ряда других экспериментов. Его судьба, однако, оказалась фатальной: 9.V.1973, выбираясь наружу из небольшого, но достаточно глубокого кратера, он задел своей крышкой склон кратера, из-за чего солнечные панели покрылись слоем реголита. Когда же крышка закрылась на лунную ночь, грунт скатился на радиаторы, что нарушило нормальную работу системы терморегулирования. И когда на следующий лунный день крышка открылась, проблемы с тепловым режимом и электропитанием привели к прекращению функционирования аппарата. Места вечной стоянки обо-

их луноходов на поверхности Луны были отсняты с американского спутника *LRO* (см. рис. 14).

Работа луноходов принесла много важных научных результатов. На Землю были переданы десятки тысяч отдельных изображений и сотни панорам, что позволило детально исследовать геологические свойства Луны, в том числе особенности рельефа, структуры и распределения кратеров. Помимо упомянутого геолого-геохимического анализа различного типа ландшафтов и свойств лунных пород, было показано, что Море Дождей и дно кратера Лемонье образованы типичными породами морских базальтов, в то время как возвышенная местность вокруг кратера Лемонье содержит более высокие концентрации железа, кремния, алюминия и калия. При помощи рентгеновского телескопа проводились наблюдения Солнца и Галактики, изучалась интенсивность космического излучения на поверхности Луны. Магнитометр *Лунохода-2* измерил слабое магнитное поле, меняющееся из-за токов, индуцированных межпланетными магнитными полями. Фотометрические измерения привели к несколько неожиданным результатам относительно яркости лунного неба. Оказалось, что в дневное время лунное небо загрязнено заметным количеством пыли, и что при свете Земли в ночное время лунное небо в 15 раз ярче, чем небо на Земле при полной Луне. Этот результат существенно ослабил интерес к перспективам создания астрономической обсерватории на лунной поверхности. Лазерные измерения при помощи уголковых отражателей, проводившиеся на обсерваториях Пик-дю-Миди в Альпах и Симеиз в Крыму, позволили уточнить периодическую и вековую динамику

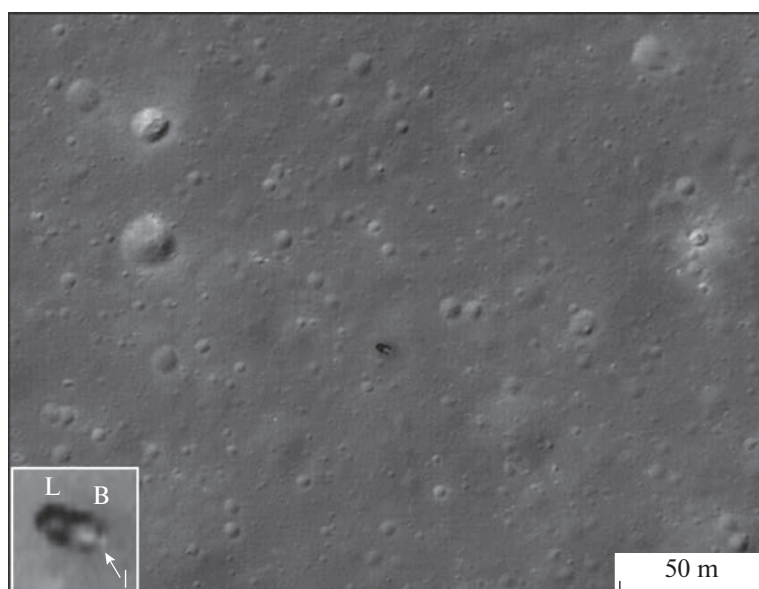


Рис. 14. Место парковки *Лунохода-2* на поверхности Луны. Снимок со спутника *LRO (NASA)*.

движения Луны. Историческое значение имеют следы, оставленные колесами луноходов в виде борозд на поверхности Луны, которые, как и следы астронавтов, в условиях слабой эрозии лунной поверхности, сохраняются миллионы лет.

Последний полет аппарата серии *E-8 Луна-24* был осуществлен в августе 1976 г., почти за четыре года до этого, в декабре 1972 г. совершил полет на Луну последний по программе *Apollo* корабль *Apollo 17*, а в 1973 г. завершил работу *Луноход-2*. С тех пор в исследованиях Луны наступило “затишье”, которое продолжалось почти 20 лет, до 1994 г., когда к Луне был запущен американский автоматический аппарат *Clementine*, хотя его целевой задачей было испытание военных технологий. Вскоре после этого были осуществлены полеты американских лунных аппаратов *Lunar Prospector*, *Smart 1*, *ARTEMIS (Acceleration, Reconnection, Turbulence and Electrodynamics of the Moon's Interaction with the Sun)*, *LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter)*, *LCROSS (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite)*, *GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory)*, *LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer)*. Наиболее успешными были миссия *LRO/LCROSS*, включавшая в себя лунный спутник *LRO* массой 1900 кг и выведшую его на окололунную орбиту последнюю ступень ракеты-носителя *LCROSS*, а также система из двух спутников *GRAIL* для изучения связи аномалий гравитационного поля с внутренним строением Луны. Спутник *LRO* с орбиты высотой около 20 км провел комплекс измерений на лунной поверхности и в окружающей космическом пространстве, включая выбор наиболее перспективных в научном и безопасных в инженерном отношении мест посадки для будущих автоматических аппаратов и пилотируемых экспедиций. На спутнике *LRO* был установлен российский прибор *LEND* для измерений методом нейтронного мониторинга водородсодержащих соединений (наиболее вероятным из которых является водяной лед) в лунных породах [7, 8]. Ранее этот метод использовался на лунных спутниках *Clementine* и *Lunar Prospector* [9, 10]. Ступень *LCROSS* была заторможена, сошла с орбиты и столкнулась с поверхностью Луны вблизи Южного полюса, чтобы в момент взрыва высвободить летучие компоненты.

За последние два десятилетия на сцену вышли новые игроки — космические агентства Китая, Индии, Японии. С начала 2000-х гг. были осуществлены полеты японского *Kaguya*, китайских *Chang-E-1*, *-2* и *-3*, индийского *Chandrayaan-1*, нацеленных, главным образом, на изучение морфологии лунного рельефа и гравитационного поля. *Chandrayaan-1* подтвердил также наличие на лунной поверхности водородных соединений (наиболее вероятно в форме воды или гидроксидов — H_2O/OH), обнаруженных ранее *Clementine*, *Lunar Prospector* и *LRO*. Большим успехом китайской

лунной программы стала высадка на поверхность Луны в район Моря Дождей в 2013 г. аппаратом *Chang'e-3* лунохода *Yutu* (Нефритовый заяц), проработавшего, однако, совсем мало, кроме астрономического инструмента *LUT* на посадочной платформе. Но Китай наращивает усилия в изучении и освоении Луны, активно развивая передовые технологии. В январе 2019 г. на обратной стороне Луны в кратере Фон Кармана совершил посадку аппарат *Chang'e-4* с луноходом *Yutu-2*, получившим ряд интересных результатов, включая обнаружение слоистости лунных пород. Наконец, 16.XII.2020 года аппарат *Chang'e-5* совершил забор лунного грунта и доставил на Землю около 1.7 кг пород.

Большую активность в исследованиях Луны проявляют индийские ученые. В июле 2019 г. был запущен аппарат *Chandrayaan-2*, в составе которого был модуль *Vikram* с луноходом *Pragyan*, но на завершающей стадии посадочный модуль разбился. Возрастающий интерес представляют исследования особенностей окололунного пространства, включающие в себя взаимодействие солнечного ветра с экзосферой Луны, электростатические поля и плазменную оболочку, которые одновременно проводятся на лунных спутниках и спутниках Земли — для изучения полей и частиц в системе солнечно-земных связей.

К сожалению, в этой ситуации Россия утратила свои передовые позиции в лунно-планетных исследованиях, которые занимала в предыдущем столетии. Мы почти полвека не летаем к Луне, сроки реализации лунных проектов постоянно сдвигаются.

СОВРЕМЕННЫЕ ЗНАНИЯ О ЛУНЕ

В этом разделе мы кратко коснемся вопросов физических и геолого-геохимических свойств Луны, которые непосредственно связаны с задачами ее настоящих и будущих исследований и проблемами освоения [11].

Морфология и рельеф поверхности. Рельеф поверхности Луны представлен крупными возвышенностями и глубокими котловинами. В отличие от видимой стороны на обратной стороне Луны преобладают возвышенности, горные массивы высотой свыше 6 км. В то же время, вблизи Южного полюса находится обширная впадина — бассейн Эйткен (рис. 15). Эта многослойная структура достигает в поперечнике 2500 км, что составляет почти четверть окружности Луны, и имеет глубину свыше 8 км относительно среднего уровня лунной поверхности (1737.4 км считая от центра), так что с учетом горных районов суммарный перепад высот достигает более 15 км. На возвышенностях расположены огромные ударные кратеры, в том числе самый большой из известных в

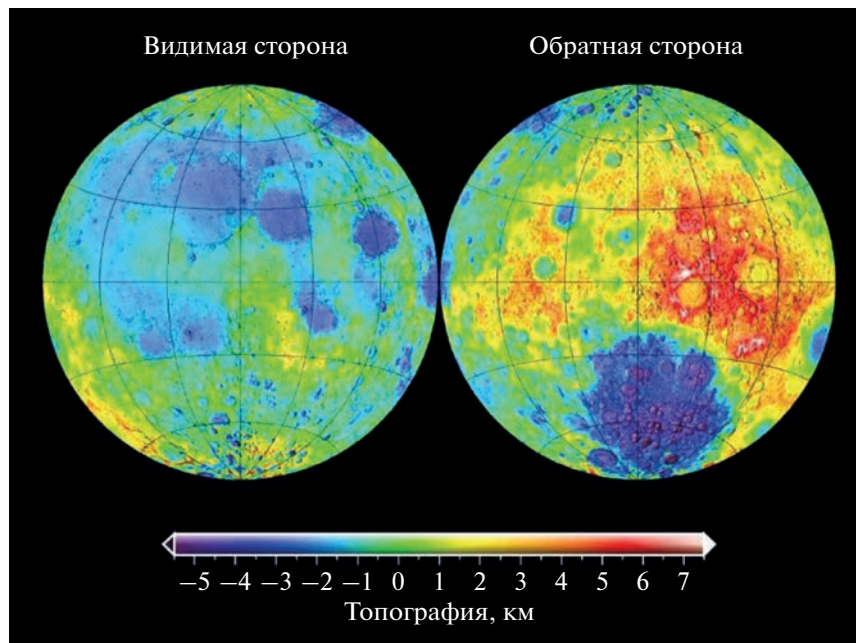


Рис. 15. Рельеф видимой и обратной стороны Луны, показанный в цвете от синего (низкие области и бассейны) до желто-красного (возвышенности и горы) (NASA).

Солнечной системе кратер Герцшпрунг диаметром 591 км и глубиной 4.5 км, находящийся восточнее несколько меньшего по размерам кратера Королев. Он представляет собой многокольцевую структуру, подобную морям на видимой стороне Луны, но не заполненную лавой, поскольку на обратной стороне таких излияний не происходило и там сохранилось гораздо больше крупных ударных структур. Вероятно, они также образовались в результате столкновения с Луной очень крупных астероидов, особенно на рубеже примерно 3.9–4 млрд лет назад в период тяжелой бомбардировки (*LHB*), когда остатки первичных тел — планетезималей и крупные астероиды выпадали на формирувавшиеся планеты. Все это свидетельствует о чрезвычайной неоднородности морфологии поверхности Луны.

Ударное происхождение подавляющего большинства кратеров подкрепляется такими типичными особенностями, как система лучей вокруг многих из них (которые могут быть кратерами вторичного происхождения, сформированными при взрыве), центральная горка, террасы на внутренних откосах валов, и т.д. [12]. Диапазон размеров варьируется от сантиметров до сотен километров, а общее количество кратеров с размером больше, чем 1 км на видимой стороне Луны, превышает 300 тысяч. Кратеры на таком лишенном атмосферы теле, как Луна, подверглись сравнительно небольшой эрозии, вызванной только бомбардировкой метеоритами и прямым взаимодействием с поверхностью солнечного ветра. Из-

за малой скорости эрозии на поверхности сохранились даже очень древние структуры.

Возраст лунных бассейнов и крупных кратеров приблизительно 4 млрд лет, что, как мы видели, совпадает с периодом *LHB* в истории Солнечной системы. В ту эпоху Луна, вероятно, имела расплавленную мантию, находившуюся на глубине 100–400 км и частично изливавшуюся на поверхность [13, 14]. Помимо этого, тонкая кора разбивалась мощными ударами тел астероидных размеров с последующим излиянием лавы, формировавшей лавовые потоки, заполнявшие бассейны. Действительно, основания бассейнов несут следы обширного растекания лунных базальтов, вязкость которых меньше земных, поскольку они содержат больше железа и меньше алюминия и кремния. Скорость их охлаждения и кристаллизации зависела от мощности потоков в условиях непосредственного взаимодействия с космическим вакуумом, что обусловило разнообразие текстур в минералах. Кроме того, бассейны являются областями концентрации масс — *масконов*, которые служат источниками четко выраженных аномалий гравитационного поля, обнаруженных лунными спутниками еще в начале 1960-х гг.

Крупные бассейны часто окружены большими возвышенностями, природа которых, вероятно, связана с этими катастрофическими событиями. Горы в экваториальных и средних широтах достигают высоты от 2 км (Карпаты) до 6 км (Апеннины). Наиболее неровный рельеф, представленный, главным образом континентами, особенно

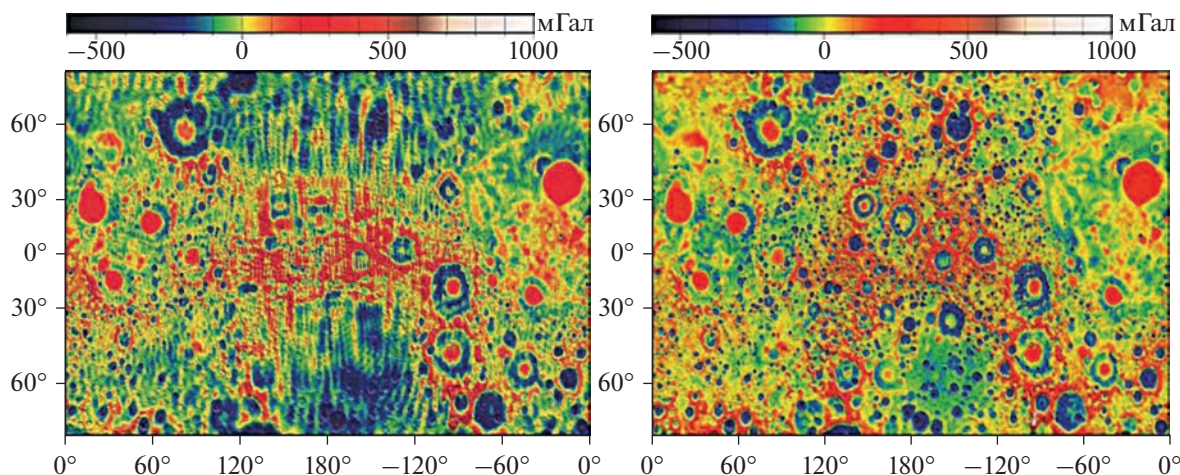


Рис. 16. Гравитационное поле видимой (слева) и обратной (справа) сторон Луны в миллигаллах (10^{-3} см с^{-2}), показанное в цвете от малых (синий) до больших (желто-оранжевый) величин (NASA).

характерен для полярных областей на обратной стороне Луны. Лунная топография на видимой и обратной сторонах Луны в целом хорошо коррелирует с особенностями гравитационного поля и глубинными свойствами.

Фигура и гравитационное поле. Луна обладает сложной фигурой и сильно неоднородным гравитационным полем, что обусловлено особенностями ее происхождения и геологической эволюции [14, 15]. Подобно земной, лунная кора представляет собой верхний слой жесткой литосферы и отличается от подкорковых частей литосферы строением и химическим составом. Но, в отличие от земной коры, поверхность которой создается, главным образом, за счет разнонаправленных воздействий тектонических движений с учетом процессов осадконакопления, сложный характер лунного рельефа и особенности слагающих его горных пород в материковых областях представляют собой реликты начальной стадии формирования из мантийных расплавов [10, 13]. В морских районах кора подверглась значительным модификациям при образовании импактных структур. Ударная бомбардировка, образовавшая на лунной поверхности многочисленные кратеры и огромные котловины, оказала сильное влияние, как на процессы дифференциации недр, так и на ранний вулканизм, характер расплавов, глобальные вариации рельефа, петрологию пород и их механические свойства. С образованием морских бассейнов на видимой стороне Луны за счет выпадения крупных тел размером в десятки и сотни километров было связано возникновение аномалий в структуре гравитационного поля в виде упоминавшихся концентраций масс — масконов, представляющих характерную особенность Луны. Наиболее детальные исследования лунного гравитационного поля и его аномалий были про-

ведены на двух космических аппаратах NASA *GRAIL A (Ebb)* и *GRAIL B (Flow)* на низкой лунной орбите, позволивших получить интересные данные о связи морфологии лунной поверхности с ее глубинными свойствами и особенностями гравитационного поля (рис. 16).

Исследования небесно-механических проблем формирования системы Земля—Луна с геолого-геохимическими природными свойствами Луны дают возможность отыскать важные аналогии в эволюции обоих тел и лучше понять особенности формирования фигуры и гравитационного поля Луны. Фигура Луны непосредственно связана с эволюцией лунной орбиты и наличием угла запаздывания приливного выступа относительно кульминации Земли как приливообразующего тела [14]. На начальном этапе эволюции при близком расположении Луны к Земле ее влияние на фигуру Луны (и, соответственно, диссипацию приливной энергии) было максимальным. Следует подчеркнуть, что с изучением системы Земля—Луна связываются ответы на ряд актуальных вопросов относительно происхождения и эволюции Земли и всей Солнечной системы.

Петрография, состав пород. Поверхность Луны состоит, главным образом, из базальтов — самых распространенных магматических пород на поверхности Земли и других планет Солнечной системы (рис. 17) [16]. В лунных базальтах выделено шесть основных типов пород, содержащих свыше 50 минералов, среди которых главное место принадлежит силикатам и окислам, а к сопутствующим минералам относятся сульфиды, карбиды, фосфаты, фосфиды. Средняя плотность пород от 3.1 до 3.4 г/см³, а главными породообразующими минералами являются широко распространенные на Земле полевые шпаты, плагиоклазы, пироксены, оливины, магнетит. В их состав входят



Рис. 17. Основные породы лунных морей и континентов. (А.Т. Базилевский. ГЕОХИ РАН).

хорошо известные на Земле химические элементы (Si, Al, Fe, Ca, Mg и др.), но в лунных породах больше, чем в земных, содержится тугоплавких элементов (Ti, Zr, Cr и др.) и меньше — легкоплавких (Pb, K, Na и др.). В целом лунная кора обеднена легколетучими и сидерофильными (“железлюбящими”) элементами, включающими семейство Fe и платиновые металлы, и обогащена труднолетучими элементами. Основной служит кремнезём SiO_2 — от 45 до 52–53%, щелочи ($\text{Na}_2 + \text{K}_2$) — от 5 до 7% и различные оксиды (TiO_2 — 1.8–2.3%; Al_2O_3 — 14.5–17.9%; Fe_2O_3 — 2.8–5.1%; FeO — 7.3–8.1%; MnO — 0.1–0.2%; MgO — 7.1–9.3%; CaO — 9.1–10.1%; P_2O_5 — 0.2–0.5%).

Хотя сами лунные породы содержат те же породообразующие минералы, которые широко распространены на Земле, по своему химическому, минералогическому составу и структуре они отличаются от земных [14, 16]. В частности, плагиоклазы, принадлежащие к важной породообразующей группе силикатных минералов в семействе полевых шпатов (Ca–Na полевые шпаты), образуют обедненный железом и обогащенный кальцием анортозит, который является главной составляющей пород лунной коры, слагающих лунные материки. Их возраст достигает 3.6–4.6 млрд лет. По своему минеральному составу (рис. 17) они относятся к интрузивным породам анортозит-норит-троктолит-габбровой серии. Их часто называют *ANT*-породы — по начальным буквам названий анортозит, норит, троктолит. Анортозит состоит почти полностью (на 75%) из плагиоклаза, оливина, пироксена и магнетита. Норит, троктолит и габбро содержат примерно в равных количествах плагиоклаз и ортопироксен (норит), плагиоклаз и клинопироксен (габбро), плагиоклаз и оливин (троктолит). В большинстве своем они являются следствием процессов метамор-

физма, в первую очередь, продуктами ударной переработки и спекания — брекчиями. В составе материков содержатся также крип-базальты (*KREEP*) — особая группа лунных пород с высоким содержанием щелочей, которые аномально обогащены калием (K), редкоземельными элементами (*Rare Earth Elements* — *REE*) и фосфором (P).

Базальты лунных морей отличаются от базальтов материковых районов: у них более высокое содержание оливина и пироксена и ниже содержание плагиоклаза и щелочей, а возраст составляет от 3.1 до 3.9 млрд лет, в то время как у материковых он близок к возрасту Земли (~4.5 млрд лет). Они обогащены железом, особенно оксидом железа на основе Fe^{2+} , и титаном в составе минерала ильменита, содержащего до ~15% Ti^{4+} , по сравнению с ~4% в земных минералах, у них также повышенное содержание оксидов алюминия и кальция и ниже содержание щелочей. В то же время материковые базальты-габбро-норит-анортозитовый комплекс пород, глиноземистые базальты и крип-базальты-характеризуются высоким содержанием щелочей, редкоземельных элементов и фосфора.

Под действием метеоритной бомбардировки, сопровождавшейся дроблением и плавлением пород, образовался особый тип верхнего слоя лунной поверхности (как и поверхности других безатмосферных тел) — реголита [12, 14, 16–20]. Его толщина достигает десятков метров, состав основных пород — оливин, пироксен, анортит, ильменит. В структуре реголита содержатся брекчии — спрессованные и сцементированные расплавы, образующиеся при ударно-взрывном воздействии. Много брекчий присутствует в образцах, доставленных лунными космическими аппаратами. Очень мелкий лунный реголит состоит из кремнеземного стекла и имеет текстуру, подобную снегу.

Таблица 1. Содержание водяного льда на месте соударения с поверхностью Луны верхней ступени ракеты (эксперимент *LCROSS*). Максимальное содержание H_2O $5.6 \pm 2.9\%$ по массе [24]

Соединение	Число молекул на единицу площади, см^{-2}	Относительное содержание в % к H_2O
H_2O	$5.1(1.4) \cdot 10^{19}$	100.00
H_2S	$8.5(0.9) \cdot 10^{18}$	16.75
NH_3	$3.1(1.5) \cdot 10^{18}$	6.03
SO_2	$1.6(0.4) \cdot 10^{18}$	3.19
C_2H_4	$1.6(1.0) \cdot 10^{18}$	3.12
CO_2	$1.1(1.0) \cdot 10^{18}$	2.17
CH_3OH	$7.8(42) \cdot 10^{17}$	1.55
CH_4	$3.3(3.0) \cdot 10^{17}$	0.65
OH	$1.7(0.4) \cdot 10^{16}$	0.03

Решающим фактором в эволюции лунного реголита и истории его накопления является послойное изменение в результате выбросов при ударах, что было подтверждено результатами анализа активности космогенных изотопов ^{26}Al и ^{22}Na , образованных космическими лучами на разной глубине [21]. С ударами метеоритов, оказывающих специфическое влияние на морфологию частиц реголита, связано образование металлического железа, ассоциированного с кристаллическими силикатами [22]. Следует подчеркнуть, что железу в восстановленном или окисленном состоянии, как и ряду других элементов, геохимиками уделяется большое внимание, поскольку это связано с аккреционной стадией формирования планетной системы. В частности, наличие в породах Луны и их минералах металлического Fe, также, как и Ti и Cr в трехвалентной форме, свидетельствует о восстановительных условиях при аккреции Луны. Данные о степени окисления железа, кремния, титана, алюминия, магния в лунных породах, в сопоставлении с различными земными породами, можно получить из анализа рентгеновских фотоэлектронных спектров этих элементов, а также кислорода, в различных квантовых состояниях. Результаты этих исследований подтвердили наличие мелкодисперсного металлического железа на поверхности частиц реголита, которое присутствует, наряду с окисленным железом, независимо от объемной концентрации FeO из-за очень низкой активности кислорода при низких температурах и, как следствие, недостаточного стехиометрического отношения. Следует при этом иметь в виду, что часть железа могла восстанавливаться до металлического из FeO силикатов при повышенной температуре.

Дефицитом кислорода на аккреционной стадии объясняется отсутствие в лунных породах Fe_2O_3 и Fe_3O_4 , поскольку для их образования требуется парциальное давление кислорода на порядки большее, чем для образования оксида FeO с двухвалентным железом Fe^{2+} . В морских базальтах его в 2–3 раза больше, чем в материковых, наряду с еще большим (на порядок) содержанием TiO_2 , но значительно меньшим содержанием Al_2O_3 и CaO. К сожалению, мы пока не можем ответить на вопрос о том, “какие процессы вызвали, в одном случае, избыток, а в другом — дефицит определенных химических элементов в лунных поверхностных породах”. Ясно, однако, что эти различия оказали большое влияние на физические свойства магмы и образование различных минералов в морских и материковых районах Луны, необычных для земных базальтов [23].

Как уже говорилось, до недавнего времени Луна считалась “сухим” небесным телом, так как согласно имевшимся данным, лунные породы обеднены водой и летучими компонентами. На самом деле, как показали новые результаты космических исследований водородсодержащих соединений, наиболее вероятным представителем которых может быть водяной лед, его содержание в верхнем поверхностном слое полярных областей Луны довольно высокое — от долей до нескольких процентов [7]. Наиболее полными на сегодняшний день являются данные нейтронного мониторинга российским прибором LEND на спутнике *LRO* (рис. 18) и спектроскопических наблюдений газового облака, выброшенного при падении ступени *LCROSS* (рис. 19, табл. 1 [24]), хотя в количественных оценках есть определенные расхождения. Показано, что область, в которой наблюдается понижение нейтронного потока (и, соответственно, повышенной концентрации водорода), простирается за пределы постоянно затененных областей глубоких кратеров, где сохранение водяного льда наиболее вероятно. Объяснить этот эффект можно, исходя из наличия сухого слоя реголита поверх слоя грунта, обогащенного водяным льдом, что сохраняет его в районах, периодически освещаемых Солнцем [7]. Наибольшая концентрация наблюдается в районе кратеров Кабео и Шумейкер — около 0.5% по массе [8]. Показано, что данные эксперимента *LEND* и оценка концентрации водорода в месте проведения эксперимента *LCROSS* совпадают в пределах статистической погрешности результатов измерений. С площади соударения размером 30–200 м^2 нагретой до температуры выше 950 K, было сублимировано около 300 кг водяного льда. *LCROSS* зарегистрировал 155 ± 12 кг воды, что составило $5.6 \pm 2.9\%$ от массы выброшенного грунта. В облаке взрыва были обнаружены следы других молекул, среди которых, помимо OH, надеж-

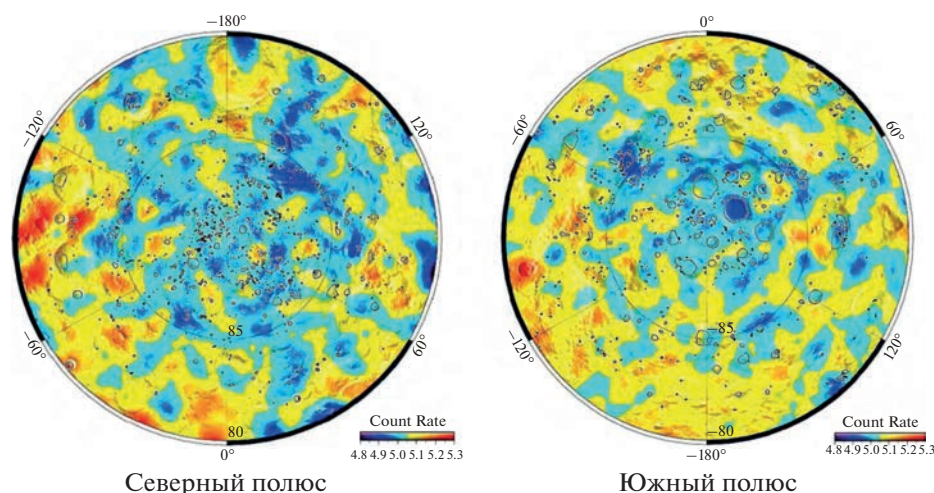


Рис. 18. Распределение водородсодержащих соединений, ассоциируемых с наличием в поверхностном слое Луны водяного льда по данным нейтронного мониторинга прибором ЛЭНД. Цвета соответствуют содержанию от фиолетового (максимальное) к желтому (минимальное) [7].

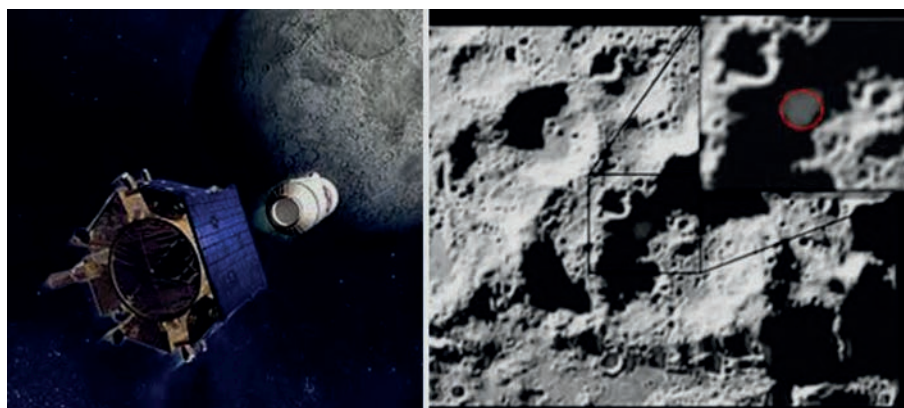


Рис. 19. КА LCROSS и место соударения с поверхностью Луны верхней ступени ракеты (NASA).

но отождествлены H_2S , SO_2 , CO_2 , NH_3 , CH_4 , C_2H_4 и CH_3OH .

Как видим, относительное содержание воды в приповерхностной полярной области Луны оказалось неожиданно большим. Так, в бассейне Южный полюс — Эйткен могут быть сосредоточены большие отложения водяного льда, летучих, а также органических соединений, прежде всего, в постоянно затененных областях глубоких кратеров [25, 26]. Здесь находятся, в частности, постоянно затененные области таких кратеров, как Шеклтон, Кабео и другие, в которых ожидаются значительные отложения водяного льда, и эти запасы воды могут стать основой жизнеобеспечения будущих экспедиций. В свою очередь, расположенная здесь же гора Малаперт представляет пример области постоянного солнечного освещения, что обеспечивает непрерывную генерацию

электроэнергии, и одновременно зону постоянной прямой связи с Землей [14].

Источниками воды, наряду с ограниченной ролью эндогенных процессов, вероятно были экзогенные механизмы — ударная бомбардировка, в первую очередь, кометами и астероидами углесто-хондритового состава, наиболее богатых летучими [27]. Исходя из предположения, что Луна подвергалась интенсивной кометной бомбардировке, легко оценить, что масса доставленной и сохранившейся в полярных областях воды могла бы составить $\sim 3 \cdot 10^8$ тонн. Вода, очевидно, находится в форме льда между частицами реголита, кристаллической воды или даже ледяных прослоек. Другим источником привнесенной воды могли быть протоны солнечного ветра, хотя не исключается и частично сохранившаяся первичная вода из лунных недр. Вследствие ударной бомбар-

дировки в реголите полярных областей могли также накапливаться другие летучие и содержащиеся в кометах органические вещества, в том числе соединения, характерные для межзвездной среды. Изучение таких веществ является одной из важных научных задач будущих исследований Луны, тесно связанных с интригующими проблемами астробиологии.

Внутреннее строение, геохимия. Особенности минералогического состава лунной поверхности неразрывно связаны с ее внутренним строением, геологической историей и формированием лунных ландшафтов [28]. Наши представления о структуре недр тел планетных размеров основываются, естественно, на данных о глубинном строении Земли, полученных путем сейсмондирования. Этот метод внес весомый вклад также в изучение внутреннего строения Луны, а для других планет земной группы он пока недоступен, и существующие представления практически целиком основываются на результатах моделирования [28, 29]. Недостаточно данных и о Луне. Один из вопросов, на который нет однозначного ответа — сохранила ли Луна жидкое ядро и, если да — каков его размер. Другие вопросы — какова природа океанов магмы в бассейнах и образования коры.

Согласно результатам моделирования, основанном на сейсмических данных экспедиций *Apollo*, слой верхней коры простирается примерно до 60 км, а ниже нее, приблизительно на 400 и 600 км, начинается, соответственно, затвердевшая верхняя и средняя мантия. В то же время, по оценкам Виноградова [30] материал коры ассимилировался в общем процессе образования кристаллических пород Луны в тесной связи с ее тепловой историей. Он исходил из того, что содержание ^{235}U в кристаллических породах периферийной лунной коры в 17–20 раз выше, чем в веществе метеоритов и, следовательно, в мантии. В процессе выплавки значительная часть ^{235}U переходит в легкоплавкую фазу, достигающую поверхности Луны. При таком содержании толщина коры не может быть больше 15–20 км, поэтому идет не разогрев недр, а потеря тепла с поверхности. Действительно, тепловой поток оказался выше ожидаемого, на уровне примерно половины от среднего земного, свидетельствуя об отсутствии на Луне современного вулканизма [31].

Кора и мантия формируют мощную литосферу, которая полностью исключает появление трещин и извержение лавовых потоков, хотя вулканическая деятельность была широко распространена на ранней Луне. На глубине около 800 км оканчивается литосфера и начинается лунная астеносфера — расплавленный слой, в котором, как и в любой жидкости, могут распространяться только продольные сейсмические волны. Температура верхней части астеносферы порядка 1200 К.

Между 1100 и 1600 км находится нижняя мантия. На глубине 1380–1570 км происходит резкое изменение скорости продольных волн — здесь проходит граница, хотя и довольно размытая, нижней мантии с ядром Луны. Таким образом, диаметр ядра оценивается величиной приблизительно 300 км [32, 33]. Размер жидкого ядра ограничен также хорошо известным безразмерным моментом инерции — для Луны он $I = 0.392$, что близко к однородному сфероиду с равномерным по радиусу распределением массы, для которого $I = 0.4$. Очень слабое магнитное поле Луны ($\sim 10^{-4}$ от земного) может быть связано с частично затвердевшим ядром и/или медленным вращением Луны.

Абсолютный возраст и датировка геологических событий в лунной истории были определены из изотопных отношений уран-свинец (U-Pb), рубидий-стронций (Rb-Sr) и калий-аргон (K-Ar) в лунных образцах пород. Эти исследования привели к выводу, что Луна сформировалась через 50–70 млн лет после образования Солнечной системы (4567.5 ± 0.5 млн лет), которое, в свою очередь, датировано по возрасту кальций-алюминиевых включений CAI в метеоритах [34, 35]. Луна, по-видимому, испытала внутреннюю дифференциацию с выделением ядра в течение последующих 200 млн лет. Наряду с ударными процессами, она оставила существенные перепады высот на лунной поверхности, особенно в полярных областях на обратной стороне Луны. Энергия ударов и нагрев мантии при распаде радиоактивных изотопов привели к извержениям лавы на поверхность с глубины, превышающей 100 км, и к заполнению лунных морей на видимой стороне, где кора была значительно тоньше. Некоторые особенности лунной морфологии связаны с охлаждением лавы, которое вызвало разломы и появление горных хребтов и долин. Эндогенные процессы прекратились 3.18 млрд лет назад, и в дальнейшем Луна подвергалась только ударной бомбардировке — главным образом, телами, мигрировавшими с периферии Солнечной системы [36]. Процессы дробления поверхностного материала метеоритами, приведшие к образованию реголита, происходили очень медленно, а эрозия была слабой. В результате Луна сохранила уникальную хронику событий на своей поверхности, включая взаимодействие с Солнцем и межпланетной средой, за более чем несколько миллиардов лет.

Луна привлекает особое внимание с точки зрения возможности лучшего понимания геологической истории Земли, потому что на поверхности Луны присутствуют наиболее древние породы, в то время как на Земле они не сохранились в связи с появлением гидросферы, атмосферы, биосферы. Поэтому, образно говоря, Луна — это окно в раннюю геологическую историю Земли. Изучение ее тепловой эволюции открывает возможности лучшего понимания комплекса проблем, свя-

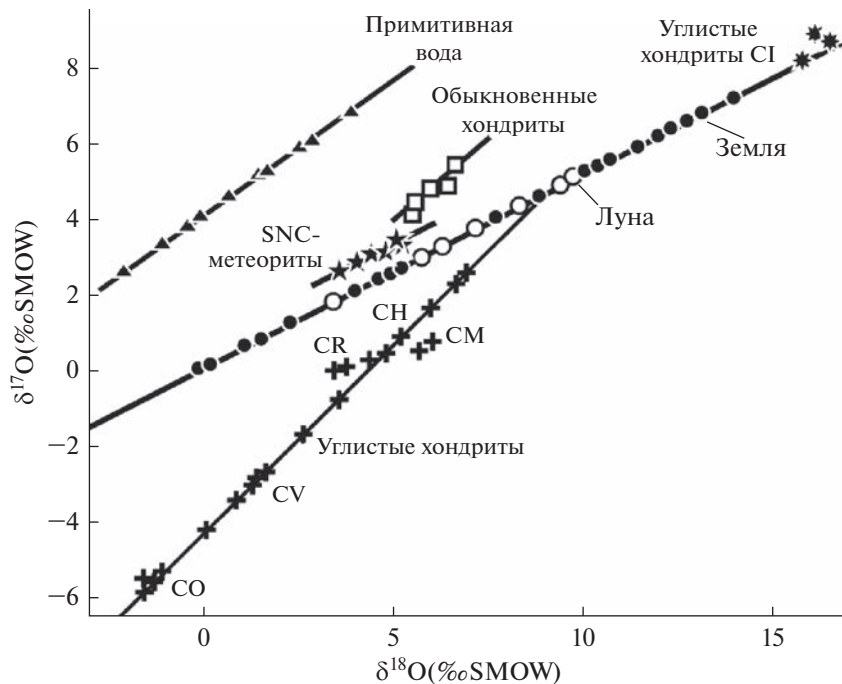


Рис. 20. Диаграмма изотопных отношений кислорода $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ и $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в сопоставлении с обыкновенными и углистыми хондритами и марсианскими метеоритами (SNC) [44].

занных с внутренним строением и формированием оболочек планетных тел [14, 37].

Происхождение и эволюция. Ключевой и до сих пор нерешенной является проблема происхождения Луны. Она имеет давнюю историю (см, напр., [38, 39]). В настоящее время рассматриваются две основные гипотезы: первая, широко распространенная на Западе, известна, как гипотеза мегаимпакта; вторая предполагает формирование Луны и Земли из общего протопланетного облака.

Гипотеза мегаимпакта, предложенная в 1975 г. американскими учеными У. Хартманном и Д. Дэвисом [40] и затем развитая Э. Камероном и У. Уордом [41], исходит из предположения, что Луна возникла в результате катастрофического столкновения с молодой Землей космического тела, по размерам и массе близкого к Марсу (оно получило название Тея по имени древнегреческой богини Земли). Согласно этому сценарию, произошедший скользящий удар колоссальной энергии выбросил из земной мантии вещество, первоначально сконцентрировавшееся на околоземной орбите в виде диска, и из этих фрагментов в процессе их последующего объединения образовалась Луна. В пользу данной гипотезы свидетельствует тот факт, что, Луна по сравнению с Землей содержит очень мало железа, примерно столько же, сколько в силикатной оболочке Земли — мантии, образовавшейся при заверенной к этому времени дифференциации вещества недр

Земли и образовании в центре тяжелого железного ядра [42].

В основе другой гипотезы, защищаемой российскими учеными Э.М. Галимовым и А.М. Кривцовым [43–45], лежит сценарий формирования обоих тел из общего протопланетного облака двух газопылевых сгустков с почти одинаковым химическим составом, последующее сжатие которых привело к образованию системы Земля–Луна. В то время как сценарий мегаимпакта подкрепляется малой объемной плотностью Луны, подобной плотности мантии Земли, то вторая идея находится в гораздо лучшем соответствии с важными космохимическими ограничениями, включая идентичность изотопных отношений (изотопных сдвигов) ряда химических элементов для Земли и Луны, среди которых соотношения трех изотопов кислорода $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$ (рис. 20), гафния-вольфрама Hf/W , рубидия-стронция Rb/Sr и др. Учитывая тот факт, что подавляющий вклад (до ~80%) в формирование мишени вносит материал ударника, который должен был составить основу объемной массы Луны, предположение о том, что космическое тело, образовавшееся за пределами орбиты Земли, имело аналогичный ей изотопный состав, представляется достаточно искусственным. Помимо этого, любой высокотемпературный взрывной процесс привел бы к разделению легких и тяжелых изотопов, свойственному кинетическому изотопному фракционированию, чего нет на Луне. Другими словами, эти обстоятель-

ства, по существу, лишают гипотезу мегаимпакта геохимического обоснования. Тем не менее, окончательный вывод пока делать рано, в частности потому, что, как показывают результаты компьютерного моделирования, оба сценария удовлетворяют необходимому ограничению, накладываемому на результирующий угловой момент системы Земля–Луна в процессе ее аккумуляции и на завершающей стадии формирования. Разновидностью данного подхода является модель формирования планет со спутниками на стадии разреженных сгущений при сохранении углового момента при столкновениях таких протопланетезималей [46, 47]. В этом сценарии важную роль на последующей стадии формирования Луны играют тела, выброшенные с ранней Земли и из окрестных областей, выпадающие на растущую Луну (мультиимпактная модель).

Последующие геолого-геохимические процессы включали ряд стадий тепловой эволюции, сопровождавших дифференциацию слагающего вещества на оболочки, о чем говорилось в разделе о лунных недрах. По современным представлениям [14, 48], процессы формирования коры и мантии Луны включали три главных периода, охватывающих интервал от ~4.5 до 3.2 млрд лет, в котором выделяют доимбрийскую, имбрийскую и эратостенианскую геологические эпохи. В эти эпохи формировались, соответственно:

- первичная кора в самой ранней истории, образующаяся из мантийных расплавов, ее последующее расслоение, модификация верхней и средней мантии, диапиры на глубине, сильно кратерированная поверхность;

- вторичная кора, аккумулярованные базальты, частично расплавленная мантия, развитый вулканизм, мантийные плюмы, вулканические горячие пятна, вынос газов из глубины (gasvents) в областях тонкой коры, нерегулярная геологическая структура лунных морей (ring-moat-domeststructures), сопровождающаяся изменением свойств морского дна;

- третичная кора, мантийные расплавы, переплавка глубинного вещества, различные формы вулканизма, метаморфизм поверхностных пород, эрозия/выветривание.

Можно предполагать, что сохранившиеся на Земле древние геологические структуры наиболее близки к третичной лунной коре и процессам, относящимся к эратостенианской эпохе. Наряду с этим Луна испытала, помимо интенсивной ударной бомбардировки, воздействие ряда динамических факторов, связанных с ее образованием, что также оказало воздействие на свойства фигуры и рельефа поверхности. Одной из нерешенных проблем остается, в частности, вопрос о том, с чем связано резкое отличие ландшафтов видимой и обратной сторон Луны.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Луна открывает уникальные возможности для ответа на ряд ключевых вопросов планетной космогонии, среди которых проблемы происхождения системы Земля–Луна и других планет Солнечной системы. Ближайшие планы Роскосмоса предусматривают запуски трех автоматических аппаратов с насыщенной научной программой, призванной дать подход к решению этих проблем.

В ГЕОХИ РАН на протяжении многих лет ведутся работы по изучению важнейших научных и прикладных направлений исследований Луны на ближайшие десятилетия, основанные на существующих знаниях и новых подходах, которые призваны ответить на ключевые вопросы относительно ее природы [14, 49, 50]. Эти разработки напрямую связаны с будущими планами освоения Луны и использования лунных ресурсов. Одновременно проводятся работы по выбору районов посадки на Луну в условиях сложного рельефа южных приполярных областей, представляющих на современном этапе наибольший научный и прикладной интерес и отвечающих требованиям по безопасности [50–54]. Среди них особенно привлекательным выглядит гора Малаперт в регионе хребта Шаклтон на 86° ю.ш. на дне крупнейшего в солнечной системе ударного кратера Южный полюс – Эйткен, который, помимо перспективных залежей водяного льда, отвечает требованиям по максимальной солнечной освещенности и непрерывной радиовидимости Земли.

Многообещающую перспективу “возвращения России на Луну” открывает запуск первого из новой серии лунных аппаратов, включенных в ФКП, *Луна-25 (Луна Глоб)*. Название *Глоб* сохранилось чисто исторически: так был назван проект многоцелевого космического аппарата, предложенного ГЕОХИ РАН еще в конце 1990-х гг. и включавшего, помимо орбитального и посадочного аппаратов, использование пенетраторов.

Запуск *Луны-25* в нынешней конфигурации нацелен на решение, главным образом, технических задач мягкой посадки на Луну, а основная научная программа будет осуществляться на *Луне-27 (Луна Ресурс)*. Научные задачи этих миссий разработаны Институтом космических исследований РАН. Главной научной задачей *Луны-25* является исследование физико-химических свойств и структуры реголита вблизи Южного полюса Луны, где по данным эксперимента *LEND* на орбитальном аппарате *LRO* и данных *LCROSS* содержится водяной лед [7, 8, 24]. На борту установлен комплекс телекамер СТС для съемки поверхности во время посадки и съемки панорам. Предусмотрены исследования содержания водяного льда, состава летучих и их распределения в верхнем поверхностном слое реголита, соотношения фаз, наличия органических соединений. С помощью

прибора АДРОН методом нейтронной каротажа намечается изучение состава основных породообразующих элементов и получение оценки массовой доли воды. Аппарат снабжен манипулятором для взятия с поверхности образцов пород с глубины до 20–30 см, масс-спектральный анализ которых будет проводиться прибором ЛАЗМА с одновременной стереосъемкой рабочего поля. На манипуляторе установлен также ИК-спектрометр ЛИС, который может наводиться на различные участки поверхности вблизи аппарата, включая раскопанные манипулятором, что позволит получить независимую оценку содержания воды в лунном грунте. Намечены исследования примыкающей к лунной поверхности разреженной газовой оболочки – экзосферы. Прибором АРИЕС будут измеряться потоки плазменной и нейтральной компонент, а детектором ПмЛ изучаться содержание в экзосфере пылевых частиц.

Запуск *Луны-26* предназначен для детального изучения с окололунной орбиты лунной поверхности – минералогического состава, структуры и состава подповерхностных слоев, включая содержание водяного льда. При помощи гамма-нейтронного спектрометра *ЛГНС* будет проводиться глобальная ядерно-физическая геологоразведка лунного реголита. Предусмотрены исследования свойств лунной экзосферы и солнечного ветра в окрестности Луны – окололунной плазмы, плотности метеорного вещества, процессов взаимодействия плазмы с поверхностью.

Научной программой *Луны-27* предусмотрены детальные исследования приполярной зоны Южного полюса, которая в перспективе может стать районом Российского лунного полигона. Должна быть обеспечена посадка с точностью около 1 км, а состав экспериментов по сравнению с *Луной-25* значительно расширен. Аппарат оборудован бурильной установкой, разрабатываемой российскими специалистами, и комплексом аналитической аппаратуры для изучения состава и свойств реголита и экзосферы. В состав научной аппаратуры входят приборы ТЕРМО и РАД для изучения теплофизических свойств полярного реголита и измерения теплового потока по глубине залегания. Предусмотрены эксперименты по спектрометрии поверхности в ИК- и оптическом диапазонах длин волн. На аппарате установлен радиомаяк с целью проведения астрометрических измерений и обеспечения пеленгации при создании опорной сети с использованием будущих посадочных аппаратов.

Последующие этапы лунной программы пока находятся в процессе обсуждения. Был предложен проект аппарата *Луна-28* для забора образцов лунного реголита с глубины до 2 метров из полярного района Луны с использованием криогенной техники с сохранением исходного состояния ве-

щества. Предполагалась высокоточная посадка в окрестности *Луны-27*. Одновременно программой *Луны-28* предусматривалась доставка на лунную поверхность малого исследовательского лунохода *МИЛ* и малого автономного исследовательского модуля *МАИМ*, которые должны были продолжить работу после старта возвратной ракеты. В задачи лунохода *МИЛ* входило проведение исследований реголита в окрестности места посадки, а в задачи *МАИМ* – непрерывный мониторинг физических параметров реголита, солнечной радиации и свойств экзосферы у поверхности Луны. Программа включала также проведение эксперимента по аддитивной печати деталей из лунного реголита с их возвращением на Землю для детального изучения свойств.

Помимо этого, специалистами ГЕОХИ РАН предложена программа широкого использования на подготовительном этапе создания лунной базы автоматов-роботов с целью создания глобальной опорной геолого-геофизической сети на лунной поверхности с применением мобильных средств, снабженных буровыми установками [54]. Подобные средства (луноходы нового класса), помимо эффективного решения актуальных научных задач, востребованы для предварительного выбора наиболее подходящих мест для строительства лунной базы с перспективой ее дальнейшего расширения, в качестве начального элемента комплексной инфраструктуры. Предусматривается создание луноходов двух типов: поисково-разведочный луноход среднего класса *Геолог-разведчик* и тяжелый луноход *Робот-геолог* (рис. 21). Они обеспечат региональную геолого-геохимическую и геофизическую съемку в полярных областях Луны, сбор, анализ и сопоставление данных о природных условиях выбранных районов на маршрутах с радиусом до 500 км, получение информации о наличии и доступности таких важнейших местных ресурсов, как водяной лед и замороженные летучие, рудные месторождения, условия освещенности, коммуникации с Землей и др., что предопределяет успешную реализацию проекта создания лунной базы. Месту ее развертывания, как уже говорилось, должен предшествовать детальный геохимический анализ образцов пород (включая керны с глубины до 6–8 м) производимый на борту лунохода, снабженного комплексом аналитических инструментов (см. [48]). Часть образцов могла бы доставляться на Землю возвратной ракетой для детальных лабораторных исследований.

Такой подход служит альтернативой региональным геологическим экспедициям с участием людей на расстояниях в десятки километров, на которые делается упор в американской лунной программе. Между тем, с учетом суровых условий на поверхности Луны, пребывание космонавтов и членов будущих экспедиций скорее должно быть

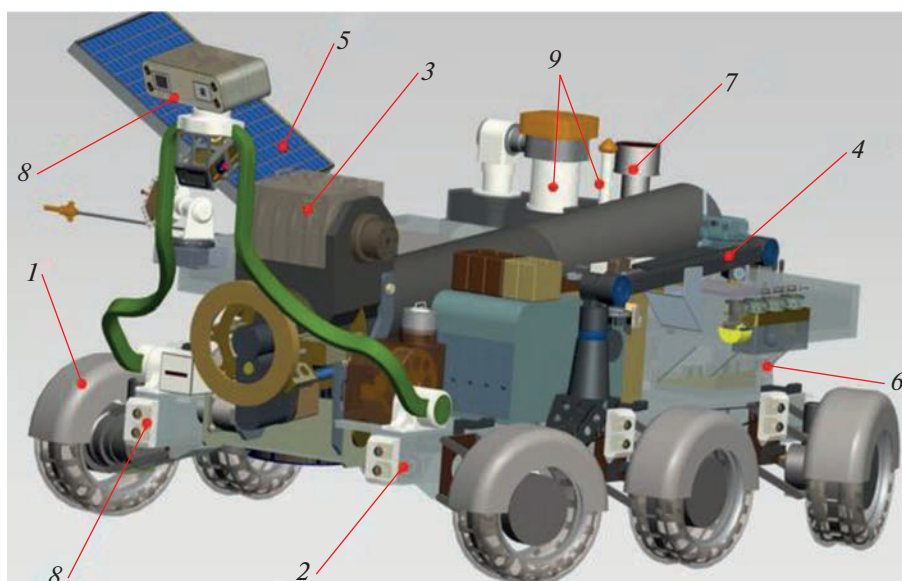


Рис. 21. Проект лунохода *Робот-геолог*. 1 — система движения; 2 — основание; 3 — бурильная установка; 4 — манипулятор; 5 — система энергоснабжения; 6 — система терморегулирования; 7 — навигационный комплекс; 8 — система технического зрения; 9 — системы управления и связи. (ГЕОХИ РАН).

ограничено относительно небольшими участками, а их роль сводится к проведению завершающих работ, осуществляемых робототехническими средствами, и отладке оборудования в условиях, защищенных от внешних факторов. Такой наиболее рациональный подход призван обеспечить максимально возможную безопасность, играющую первостепенную роль при реализации стратегии освоения человеком Луны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Луна представляет первостепенный интерес для планетной космогонии, планетологии и наук о Земле — геофизики, геологии, геохимии. Ключевое значение имеет сравнительное изучение Земли и Луны, формирования их геолого-геохимических особенностей, сходства и различия основных этапов эволюции в контексте комплексного изучения Солнечной системы. Между тем, несмотря на значительный прогресс в знаниях о населяющих ее телах — планетах и спутниках, кометах, астероидах, ответы на многие ключевые вопросы о происхождении и эволюции Солнечной системы, пока не найдены. К ним относятся, в частности, проблемы происхождения и внутреннего строения Луны, дальнейшее детальное изучение которой имеет важнейшее значение для реконструкции основных эволюционных процессов всего семейства тел Солнечной системы. Это одновременно позволит лучше понять раннюю историю Земли и причины различных путей эволюции Земли и планет земной группы.

Советский Союз положил начало полетам лунных космических аппаратов и внес основополагающий вклад в ее изучение. Были получены первые в мире фотографии обратной стороны Луны, осуществлена первая мягкая посадка на Луну, запущен первый искусственный спутник Луны, созданы аппараты для автоматического забора и доставки на Землю лунного грунта и самоходные аппараты — луноходы. Была отработана система возвращения на Землю после облета Луны аппарата со второй космической скоростью, получены уникальные снимки лунной поверхности и ряд важных научных результатов. К сожалению, разрушительные социально-экономические процессы в стране, сопровождавшие перестройку, оказали пагубное влияние на космическую сферу деятельности, особенно на научные исследования, отбросившие нас на десятилетия назад. Возрождение началось лишь с наступлением нынешнего столетия, но процесс этот крайне медленный. Только в самое последнее время открылись возможности вернуться к исследованиям Луны в рамках национальной программы.

Луну естественно рассматривать в качестве форпоста на пути освоения человечеством космического пространства. К этому убеждению постепенно приходят даже бывшие сторонники выбора пилотируемой экспедиции на Марс в качестве главной задачи ближайших десятилетий. Освоение Луны, как стратегического плацдарма, создание элементов ее будущей инфраструктуры и начало использования местных ресурсов — все это сегодня в повестке дня ведущих космических

держав. Наибольшее внимание привлекают лунные полярные области, где обнаружены отложения водяного льда и замороженных летучих, что облегчает получение воздуха, воды, а в перспективе — даже ракетного топлива на основе H_2 и O_2 при освоении Луны. Содержащиеся в лунных породах железо, алюминий, кремний, титан и другие элементы и их соединения могут широко использоваться на месте при производстве строительных материалов на основе прогрессивных технологий и больших энергозатрат. Этому этапу должна предшествовать детальная геолого-геохимическая разведка с широким использованием мобильных робототехнических средств с целью выявления потенциально наиболее перспективных мест для создания обитаемой базы на поверхности Луны, включая запасы лунных ресурсов и перспективы использования наиболее эффективных методов их добычи и переработки. Первостепенную роль играют вопросы безопасности при освоении Луны, в первую очередь, радиационной и пылевой обстановки, для чего необходим длительный автоматический мониторинг природных условий в местах будущих поселений и выбор средств защиты.

На современном этапе исследований наибольшее внимание уделяется полярным областям, как потенциально наиболее востребованным с точки зрения использования местных природных ресурсов при освоении Луны. Обширные планы лунных исследований у американского, европейского, китайского космических агентств, все больший интерес к ним проявляют Индия, Япония и Южная Корея. США намечают возобновить пилотируемые полеты на Луну уже в этом десятилетии и сделать их регулярными с целевой задачей начала создания Лунной базы с присутствием на лунной поверхности 2–4 астронавтов. Эта задача обосновывается научно-образовательными, инновационными и экономическими соображениями, но надо думать, что в основе лежат стратегические цели. Южный полюс также является целью российских миссий *Луна-25* и *Луна-27*, которые открывают многоцелевую программу с эффективным использованием нового поколения робототехнических средств. Эта программа должна предшествовать российским планам пилотируемых полетов на Луну.

110 лет назад, в 1911 г., началось исследование Южного полюса Земли, а полстолетия спустя Антарктида стала местом пребывания для нескольких тысяч людей из почти 30 стран, постоянно ведущих там широкомасштабные научные исследования. В современную эпоху аналогом этого процесса может стать начало освоения Южного полюса Луны. Можно думать, что создание лунных баз, как первого этапа на этом пути, начнется уже к середине 21-го столетия. Оно станет новой вехой в развитии человеческой цивилизации и

достойно ознаменует столетнюю годовщину запуска первого искусственного спутника Земли.

Автору довелось участвовать на протяжении многих лет в космических исследованиях Луны и планет вместе с многочисленными коллегами из НПО Лавочкина, Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. Мой долг выразить всем им — и ушедшим из жизни, и ныне живущим — глубочайшую признательность за тесное дружеское сотрудничество.

Данная работа выполнена в соответствии с плановыми исследованиями по госзаданию ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Келдыш М.В., Маров М.Я. Космические исследования. М.: Наука, 1981. 192 с.
2. Семенов Ю.П. (Ред.). Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королева (1946–1996). М.: РКК Энергия, 1996. 671 с.
3. Черток Б.Е. Ракеты и люди. Т. 3. М.: Машиностроение, 1997. 398 с.
4. Маров М.Я., Хантрес У.Т. Советские роботы в Солнечной системе. Технологии и открытия. Изд. 2-е. М.: Физматлит, 2018. 612 с.
5. Полищук Г.М., Пичхадзе К.М. (Ред.) Автоматические космические аппараты для фундаментальных научных и прикладных исследований. М.: МАИ-Принт, 2010. 660 с.
6. Ахманова М.В., Дементьев Б.В., Марков М.Н. Вода в реголите моря Кризисов (*Луна-24*)? // Геохимия. 1978. № 2. С. 285–288.
7. 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. 2010. V. 330. № 6003. P. 483–486.
8. 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.
9. 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. P. 1496–1500.
10. Jolliff B.L., Gillis J.J., Haskin L.A. et al. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins // J. Geophys. Res. 2000. V. 105 (E2). P. 4197–4216.
11. Маров М.Я. Космос. От Солнечной системы вглубь Вселенной. 2-е изд., исп. и доп. М.: Физматлит, 2018. 544 с.
12. Melosh H.J. Impact cratering: A geologic process. Oxford, N.-Y.: Oxford University Press, 1989. 262 p.
13. Head J.W. III, Wilson L. Generation, ascent and eruption of magma on the Moon: New insights into source depths, magma supply, intrusions and effusive/explosive eruptions (Part 2: Predicted emplacement processes and observations) // Icarus. 2017. V. 283. P. 176–223.

14. Маров М.Я., Воронаев С.А., Инатов С.И. и др. Формирование Луны и ранняя эволюция Земли. М.: Ленард, 2019. 320 с.
15. Bussed D.B.J., Spudis P.D., Robinson M.S. Illumination conditions at the lunar south pole // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 9. P. 1187–1190.
16. Виноградов А.П. (отв. ред.). Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. 764 с.
17. Тарасов Л.С., Назаров М.А., Шевалеевский И.Д. и др. Типы пород и химия минералов лунного грунта из Моря Кризисов // *Геохимия*. 1977. № 10. С. 1488–1509.
18. Назаров М.А., Тарасов Л.С., Шевалеевский И.Д. Минералогия материкового реголита (“Луна-20”) // *Грунт из материкового района Луны*. М.: Наука, 1979. С. 226–266.
19. Shkuratov Yu.G., Bondarenko N.V. Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data // *Icarus*. 2001. V. 149. P. 329–338.
20. Head J.W. III, Wilson, L. Rethinking lunar mare basalt regolith formation: New concepts of lava flow protolith and evolution of regolith thickness and internal structure // *Geophysical Research Letters*. 2020. V. 47. № 20. Article id. e88334.
<https://doi.org/10.1029/2020GL088334>
21. Виноградов А.П., Лаврухина А.К., Горин В.Д., Устинова Г.К. Космогенные ^{26}Al и ^{22}Na в лунном реголите, доставленном “Луной 16” // *ДАН СССР*. 1972. Т. 202. № 2. С. 437–440.
22. Виноградов А.П. О генезисе реголита Луны // *Лунный грунт из Моря Изобилия*. М.: Наука, 1974. С. 348–355.
23. Виноградов А.П. Дифференциация вещества Луны и планет на оболочки // *Космохимия Луны и планет* / Ред. А.П. Виноградов. М.: Наука, 1975. С. 5–28.
24. Colaprete A., Schultz P., Heldmann J. et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // *Science*. 2010. Vol. 330(6003). P. 463–468.
25. Zhang J.A., Paige D.A. Cold-trapped organic compounds at the poles of the Moon and Mercury: Implications for origins // *Geoph. Res. Lett.* 2009. V. 36. L16203. 5 pp.
26. Zuber M.T., Head J.W. III, Smith D.E. et al. Constraints on the volatile distribution within Shackleton crater at the lunar south pole // *Nature*. 2012. V. 486. P. 378–382.
27. Маров М.Я., Инатов С.И. Доставка воды и летучих к планетам земной группы и к Луне // *Астрономический вестник*. 2018. Т. 52, № 5. С. 402–410 (Маров М.Я., Ипатов С.И. Delivery of water and volatiles to the terrestrial planets and the Moon // *Solar System Research*. 2018. V. 52. № 5. P. 392–400).
28. Жарков В.Н., Паньков В.Л., Калачников А.А., Оснач А.И. Введение в физику Луны. М.: Наука, 1969. 312 с.
29. Хаббард Я.Дж., Родс Д.М. Химическая модель формирования лунных неморских пород (перевод Ионова Д.А.) // *Космохимия Луны и планет.* / Ред. А.П. Виноградов. М.: Наука, 1975. С. 425–438.
30. Виноградов А.П. Кратко о Луне // *Вестник МГУ. Серия геол.* 1973. № 6. С. 3–9.
31. Маров М.Я., Слюта Е.Н. Тепловой поток и теплофизические свойства реголита // *Солнечная система* / Ред. Г.Г. Райкунов. М.: Физматлит, 2014. С. 63–65.
32. Кусков О.Л., Кронрод В.А. Геохимические ограничения на модель строения и тепловой режим Луны согласно сейсмическим данным // *Физика Земли*. 2009. № 9. С. 25–40.
33. Kuskov O.L., Kronrod E.V., Kronrod V.A. Thermochemical constraints on the lunar bulk composition and the structure of a three-layer mantle // *Phys. Earth Planet. Interiors*. 2019. V. 286. P. 1–12.
34. Галимов Э.М. Анализ изотопных систем (Hf-W, Rb-Sr, I-Pu-Xe, U-Pb) применительно к проблеме формирования планет на примере системы Земля – Луна // *Проблемы зарождения и эволюции биосферы* / Ред. Э.М. Галимов. М.: Красанд, 2013. С. 47–59.
35. Иванова М.А. Са, Al-включения из углистых хондритов – самые древние образования Солнечной системы // *Геохимия*. 2016. № 5. С. 409–426.
36. Маров М.Я., Инатов С.И. Процессы миграции в Солнечной системе и их роль в эволюции Земли и планет // *УФН*. 2022 (в печати).
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.08.039044>
37. Toksoz M.N., Solomon S.C. Thermal history and evolution of the moon // *The Moon*. 1973. V. 7. P. 251–278.
38. Urey H.C., MacDonald G.J.F. The origin and history of the Moon // *Physics and Astronomy of the Moon* / Ed. Z. Kopal. London: Academic Press, 1971. P. 230–316.
39. Рускол Е.Л. Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 188 с.
40. Hartmann W.K., Davis D.R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin // *Icarus*. 1975. V. 24. P. 504–515.
41. Cameron A.G.W., Ward W.R. The origin of the Moon // *Lunar and Planetary Science Conference*. 1976. V. 7. P. 120–122.
42. Canup R.M. Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact // *Science*. 2012. V. 338. P. 1052–1055.
43. Галимов Э.М. Проблемы образования Луны // *Основные направления геохимии*. М.: Наука, 1995. С. 8–45.
44. Галимов Э.М. Образование Луны и Земли из общего супрапланетного газопылевого сгущения // *Геохимия*. 2011. № 6. С. 563–580.
45. Galimov E.M., Krivtsov A.M. Theories of the Origin of the Moon. New concept: Geochemistry and Dynamics. De Gruyter, 2012. 168 p.
46. Ipatov S.I. The angular momentum of two collided rarefied preplanetesimals and the formation of binaries // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2010. V. 403. P. 405–414.
47. Инатов С.И. Формирование небесных тел со спутниками на стадии разреженных сгущений // *Механика, управление и информатика*. 2015. Т. 7. № 3 (56). С. 386–399.
48. Wiczorek M.A., Neumann G.A., Nimmo F. et al. The crust of the Moon as seen by GRAIL // *Science*. 2013. V. 339(6120). P. 671–675.

49. *Базилевский А.Т., Абдрахимов А.М., Дорофеева В.А.* Вода и другие летучие на Луне (обзор) // *Астрономический вестник*. 2012. Т. 46. № 2. С. 99–118.
50. *Маров М.Я., Слюта Е.Н.* Лунный реголит. Вода. Особенности опробирования замороженных летучих // *Солнечная система* / Ред. Г.Г. Райкунов. М.: Физматлит, 2014. С. 80–86.
51. *Pieters C.M., Head J.W. III, Gaddis L. et al.* Rock types of South Pole-Aitken basin and extent of basaltic volcanism // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106(E11). P. 28001–28022.
52. *Иванов М.А., Маров М.Я., Базилевский А.Т., Костицын Ю.А.* Кратер Богуславский на Луне: выбор места посадки для спускаемого аппарата экспедиции Луна-Глоб // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2017. № 2 (36). С. 44–51.
53. *Basilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Ivanov M.A. et al.* Potential lunar base on Mons Malapert: Topographic, geologic and trafficability considerations // *Solar System Research*. 2019. V. 53. P. 383–398.
54. *Marov M.Ya., Slyuta E.N.* Early Steps towards the Lunar Base Deployment: Some Prospects // *Acta Astronautica*. 2021. V. 181. P. 28–39.