

УДК 523

РОССИЙСКИЙ ПРОЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУНЫ

© 1999 г. Э. М. Галимов*, С. Д. Куликов**, Р. С. Кремнев**, Ю. А. Сурков*, О. Б. Хаврошкин***

* *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН*

** *НПО им. С.А. Лавочкина Российского космического агентства*

*** *Объединенный институт физики Земли РАН*

Поступила в редакцию 24.02.99 г.

Российский проект исследования Луны направлен на решение двух задач: выяснение внутреннего строения Луны и определение состава летучих в полярном районе Луны. Определение внутреннего строения, в том числе ответ на вопрос о наличии и размерах железного ядра Луны, имеет решающее значение для разрешений альтернативы, касающейся механизма образования Луны и Земли. Анализ летучих *in situ* откроет путь к пониманию не только истории Луны, но и происхождения углерод-водного вещества Земли. С целью решения поставленных задач предприняты научно-исследовательские работы, в ходе которых разработан план экспериментов, определен состав приборного комплекса, облика космического аппарата и сценарий космической экспедиции. Для решения главной задачи - определения внутреннего строения Луны - планируется осуществить два сейсмических эксперимента: 1) с использованием двух разнесенных на расстояние около 300 км посадочных аппаратов, несущих широкополосные сейсмометры, и 2) малоапертурной сейсмической группы, образующей размещением на площади диаметром около 10 км 10 сейсмометров, доставленных к поверхности Луны высокоскоростными пенетраторами. Полярную станцию планируется посадить на дно кратера в районе Южного полюса. Научный комплекс полярной станции содержит γ -спектрометр, нейтронный спектрометр, масс-спектрометр, телевизионную камеру и ряд других приборов. Космический аппарат рассчитан на использование ракет-носителей типа "Молния" или "Союз-2-Фрегат".

ВВЕДЕНИЕ

Целесообразность возвращения к исследованию Луны обусловлена несколькими причинами: 1) полностью переработан и осмыслен фактический материал, полученный в 60-70-е годы; 2) сформулированы новые задачи, связанные с развитием земной геологии и космохимии; 3) появились технологии и инструменты, позволяющие получить новые данные с детальностью и точностью ранее недоступной; 4) возникли проекты создания на Луне станций с целью использования ее ресурсов, астрономических наблюдений и т.д.

Исследование Луны имеет ключевое значение для решения проблем фундаментальной геологии. Подобно тому как в последние десятилетия исследования океанической коры, прежде всего бурение в океане, привели к коренному изменению представлений о земной тектонике и динамике геологических процессов, именно от исследования Луны следует ожидать нового крупного прорыва в науках о Земле. Луна во многих отношениях является уникальной лабораторией. Благодаря отсутствию атмосферы, сейсмической стабильности и экранированию от земных радиосигналов обратной стороны, Луна - идеальное мес-

то для размещения астрофизических станций и других подобных объектов. Имеются серьезные проекты использования Луны в будущей энергетике. Считается, что земные источники энергии, включая природное топливо и ядерное горючее, не справятся с потребностями производства к середине будущего века. Предложены два возможных пути решения проблемы. Оба они связаны с освоением Луны. Во-первых, это проект использования ^3He в термоядерном синтезе, с добычей и доставкой ^3He с Луны. Уже сегодня этот способ был бы экономически более выгодным, чем использование горючих ископаемых или урана, если бы была готова технология термоядерного синтеза и соответствующая инфраструктура. Во-вторых, получил развитие и обоснование проект создания солнечных станций на Луне с передачей на Землю энергии посредством микроволновых конверторов.

Российский проект исследования Луны отдает приоритет двум целям. Первая из них - выяснение внутреннего строения Луны, в том числе наличия и размеров ядра. Вторая задача - анализ состава летучих, в том числе воды, которые могут быть сконцентрированы в понижениях рельефа на лунных полюсах.

ПРИОРИТЕТНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУНЫ

Проблема происхождения Луны

В отношении исследования Луны существует актуальная научная задача, решение которой приведет к серьезному прогрессу в науках о Земле и планетах. Задача эта возникла в связи с развитием земной геологии. Речь идет о проблеме происхождения Луны.

Понимание механизма формирования Луны дает ключ к пониманию механизма формирования Земли. В свою очередь понимание механизма формирования Земли, ее ранней геологической истории, переходит сейчас из разряда академических задач естествознания в число тех фундаментальных проблем, решение которых существенно для развития практической геологии, экологического прогноза и т.п.

В настоящее время большинство рассматривает образование Луны как результат столкновения Земли с крупным космическим телом около 0.1 массы Земли, т.е. размером с планету Марс. В результате этого столкновения на околоземную орбиту было выброшено вещество мантии Земли, которое затем аккумулировалось в спутник. Луна в этом случае унаследовала химический состав земной мантии, что объясняет ее относительно низкую плотность и отсутствие массивного у нее железного ядра. Оно не может быть больше 5% массы Луны, в то время как на Земле железное ядро составляет 32% ее массы. Гипотеза была выдвинута американскими учеными (Хартманом, Денисом, 1975 и Камероном, Уордом, 1976).

Альтернативой является гипотеза, исследованная Э.М. Галимовым (1990; 1996), которая состоит в том, что Луна образовалась не из вещества Земли, а, также как и Земля, из вещества космического состава (материально ближе всего к этому составу вещество углистых хондритов типа CI), т.е. формирование Земли и Луны протекало не последовательно, а параллельно, при этом железо было утрачено в ходе некоторого высокотемпературного процесса.

Имеются и другие варианты формирования Луны и Земли из общего протопланетного резервуара (Рускол, 1975; Вассон, Уоррен, 1979; Вейденшиллинг и др., 1986). Хотя они содержат в некоторых случаях справедливую критику теории мегаимпакта (Боярчук и др., 1998), они не опираются на аргументы, касающиеся вещественного состава и поэтому не предлагают вещественные критерии, которые можно было бы проверить.

Понятно, что, в зависимости от того, какая из указанных выше альтернативных гипотез имела место, совершенно меняется представление о ранней истории Земли.

Цель нашего проекта - определить те физико-химические параметры, измеряя которые можно было бы произвести достоверный выбор в пользу одного из возможных путей формирования Луны и системы Земля-Луна.

Геохимический анализ проблемы показывает, что такие параметры существуют. Одной из ключевых является проблема тугоплавких элементов. В настоящее время отсутствует достоверная оценка содержания в веществе Луны тугоплавких элементов, в число которых входят Al, Ca, Ti, U, Th, Sr, редкие земли и др. Избыток тугоплавких элементов означает, что космическое тело имело в своей истории высокотемпературный этап. Лабораторные эксперименты с испарением силикатных расплавов в вакууме показывают, что обогащение тугоплавкими элементами неизбежно влечет за собой утрату железа. Однако Луна содержит железа, по крайней мере, не меньше, чем земная мантия. Поэтому, если Луна обогащена тугоплавкими элементами, она не может происходить из вещества земной мантии.

Вопрос о том, обогащена ли Луна тугоплавкими элементами, нельзя решить, анализируя образцы лунных пород. Породы лунной коры существенно обогащены Al, Ca, Ti. Зато верхняя мантия, из которой эти породы выплавлены, характеризуется низкими содержаниями тугоплавких элементов (рис. 1а). Поэтому решающее значение приобретает оценка содержания тугоплавких элементов в нижней мантии. Породы нижней мантии недоступны для непосредственных исследований. Существует, однако, связь между содержанием Al_2O_3 (Al - один из главных тугоплавких элементов) и упругими свойствами пород. При высоких содержаниях Al_2O_3 в нижней мантии ее минеральный состав (высокое содержание граната (22-28%) и магнезиальный характер оливина и пироксена) отвечает определенному диапазону возможных скоростей сейсмических волн (рис. 1б). Следовательно, получив профиль скоростей сейсмических волн для внутренней части Луны, можно было бы ответить на вопрос, обогащена ли Луна тугоплавкими элементами по сравнению с Землей или нет.

Более того, при повышенном содержании Al_2O_3 в нижней мантии соблюдение ограничений, связанных с известной средней плотностью и моментом инерции Луны, требует наличия заметного ядра - около 5% массы Луны (радиус ~500 км) (рис. 1в). Напротив, если содержание тугоплавких элементов на Земле и Луне одинаково, то Луна должна иметь небольшое ядро, или оно может отсутствовать совсем. Следует отметить, что существующая интерпретация сейсмических данных для Луны (модель Накамуры) указывает, скорее, на повышенное содержание Al_2O_3 (7-10%) в составе нижней мантии (Худ, 1986; Кусков,

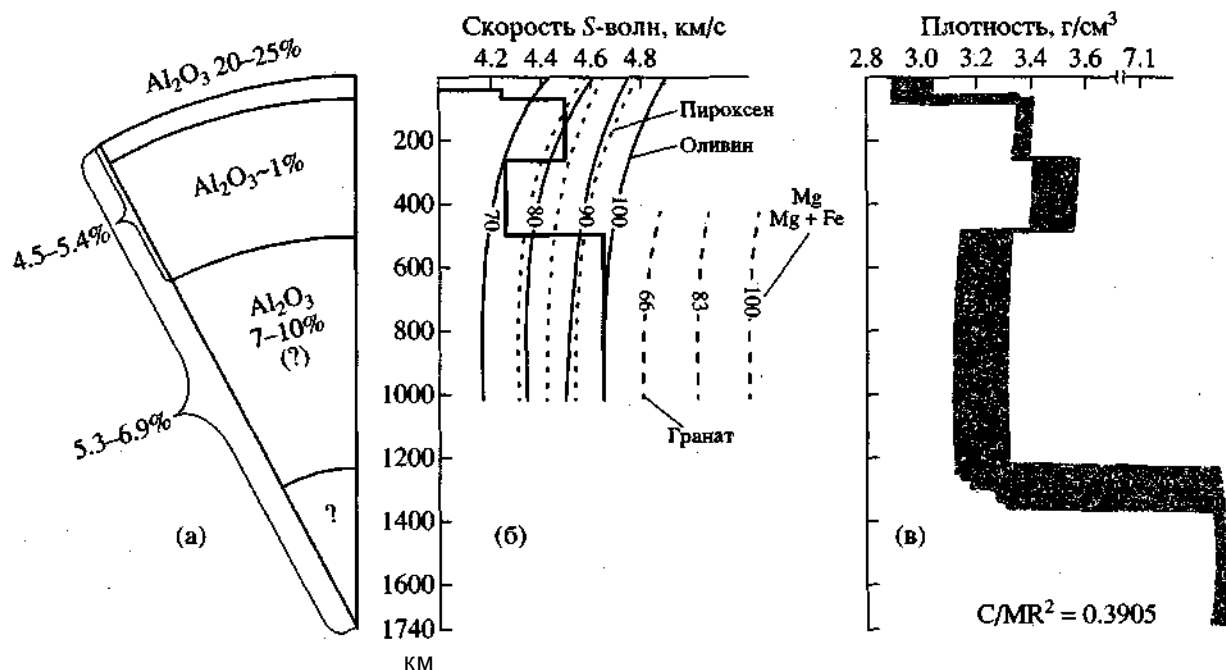


Рис. 1. Связь химического и физического строения Луны.

а - известное для лунной коры и предполагаемое для других оболочек Луны распределение Al_2O_3 ; б - сейсмический профиль (жирная линия) по данным экспедиций "Аполлон" (Накамура, 1983) и расчетные кривые скоростей S-волн для глубинных минералов (Худ, 1986); в - семейство расчетных кривых (Худ, 1986), описывающих плотностную стратификацию Луны, соответствующую обогащенной Al_2O_3 нижней мантии. Во всех случаях расчет показывает наличие значительного по размерам ядра (с радиусом 300-500 км).

Фабричная, 1994). Однако имеющиеся сейсмические данные, основанные на экспериментах, поставленных во время экспедиции "Аполлон", скудны и не дают оснований для окончательных выводов.

Другой геохимический критерий условий формирования Луны связан с характером распределения сидерофильных элементов на Луне и Земле. Сидерофильные элементы (Ni, Cd, W, P, Pt, Re, Te и т.п.) имеют сродство к: железу и при выделении планетного ядра уходят в состав ядра, обедняя вещество мантии.

Степени обедненности сидерофильными элементами мантии Земли и Луны достаточно близки, что служит сильным аргументом в пользу гипотезы образования Луны за счет вещества земной мантии. Сходство в распределении сидерофильных элементов в веществе Земли и Луны предполагает, что ядро в Луне должно отсутствовать или по крайней мере не превосходить 0.4% массы Луны. В противном случае произошло бы избыточное обеднение Луны сидерофильными элементами относительно Земли.

С другой стороны, при определенных условиях наблюдаемое распределение сидерофильных элементов может возникнуть и в том случае, если Луна образовалась из вещества космического состава (Галимов, 1996). В этом случае, однако, яд-

ро должно иметь массу не менее 4.5-5.5% массы Луны.

Отсюда следует, что размер ядра имеет критическое значение для решения проблемы происхождения Луны. Гипотеза формирования Луны из вещества земной мантии может быть справедливой только в случае, если Луна имеет очень небольшое ядро (0.4% массы Луны) или не имеет ядра вовсе, напротив, гипотеза формирования Луны из вещества солнечного состава требует наличия ядра с массой 4.5-5.5% (Галимов, 1996).

Геохимические критерии происхождения Луны, таким образом, могут быть реализованы посредством геофизических экспериментов, направленных на изучение внутреннего строения Луны.

Сейсмические эксперименты на Луне ранее проводились в рамках программы "Аполлон". В той или иной степени достоверный профиль скоростей удалось получить до глубин около 1000 км. Однако упругие свойства внутренней части Луны, а также размер ядра остаются неизвестными.

Отсюда - первая задача проекта: постановка сейсмического эксперимента, который позволил бы с использованием современных методов получить информацию о внутреннем строении Луны.

Проблема происхождения воды и углерода

До сих пор остаются открытыми вопросы, связанные с происхождением и историей важнейших летучих Земли. Например: образовался ли океан в результате дегазации мантии Земли или вода была привнесена в составе вещества типа углистых хондритов и комет, выпавших на поверхность на заключительной стадии формирования планетного тела? Почему изотопный состав водорода Мирового океана и мантии Земли столь сильно отличаются: могли ли соединения углерода, наблюдаемые в составе углистых метеоритов и комет, дать начало развитию биосферы Земли.

Решению этих вопросов могло бы способствовать изучение состава и эволюции летучих Луны (воды, соединений углерода, азота и т.п.). Эти компоненты на поверхности Луны и в породах ее коры не сохранились. Однако поскольку лунная полярная ось отклоняется от нормали к плоскости эклиптики всего на 1.5° , понижения рельефа в районе полюсов, например, основания кратеров могли никогда не освещаться Солнцем. В результате здесь должна была установиться очень низкая температура (~ 40 К). В этом случае вода и другие летучие, появившиеся на поверхности Луны в процессе ее дегазации или выпадения с кометами и метеоритами, будут вымораживаться. Накопление в течение длительного геологического времени может привести к конденсации в реголите полярных областей значительных масс льда (Арнольд, 1979).

Орбитальная съемка, выполненная в 1994 г. американским КА "Клементина", обнаружила в районе Южного полюса депрессию, значительная часть площади которой оставалась затененной (Шумейкер и др., 1994). По данным исследований с американского орбитального спутника "Лунар Проспектор", как на Южном, так и на Северном полюсах Луны действительно имеет место увеличение концентрации водорода.

Конденсация и сохранение воды и соединений углерода в полярных районах Луны создает уникальную возможность заглянуть в прошлое и изучить состав примитивного углерод-водного вещества Земли.

Исключительное значение имел бы отбор грунта в полярном районе и доставка его на Землю, что позволило бы провести его детальные исследования, включая прецизионный изотопный анализ.

Однако на первом этапе целесообразно провести исследования *in situ* чтобы убедиться в существовании льда, оценив состав грунта и концентрации в нем воды и других летучих.

Исследование грунта в зоне вечной тени при помощи посадки полярной станции мы рассматриваем как вторую приоритетную задачу проекта.

ПЛАНИРУЕМЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТА

В 1997 г. Российским космическим агентством были выделены средства на проведение научно-исследовательских работ по проекту исследования Луны (условное название "Луна-Глоб"), что позволило конкретизировать характер планируемых экспериментов, разработать облик космического аппарата и сценарий космической экспедиции.

Сейсмический эксперимент

Сейсмические исследования, направленные на решение главной задачи - определение внутреннего строения Луны - предполагается осуществить путем параллельного проведения сейсмических экспериментов двух типов: 1) созданием малоапертурной сейсмической группы; 2) использованием станций, снабженных сверхширокополосным сейсмоприемником.

Эксперимент с использованием малоапертурной сейсмической группы предлагается геофизиками Института физики Земли (О.Б. Хаврошкин).

Предварительные расчеты показывают, что удовлетворительные результаты могут быть получены при помощи группы из 10 сейсмоприемников, установленных на высокоскоростных пенетраторах, внедряемых в грунт на поверхности Луны на площади диаметром приблизительно 10 км (рис. 2) при расстоянии друг от друга около 2-3 км.

Сведения о внутреннем строении Луны предполагается получить путем обработки сейсмических данных в рамках нескольких сейсмических методов, в том числе метода передаточных функций и метода, использующего эффект модуляции (Хаврошкин, Циплаков, 1996).

Суть метода передаточных функций заключается в совместном анализе всей совокупности вторичных многократных и обменных волн и пересчете волновых форм в скоростной разрез. Метод передаточных функций предполагает знание точной ориентации горизонтальных сейсмографов по странам света. В случае эксперимента с группой пенетраторов, внедряющихся в лунный грунт не одновременно, продольные волны, возбужденные проходящими пенетраторами, могут регистрироваться уже работающими приборами. При известных координатах всех пенетраторов можно определить ориентацию горизонтального сейсмографа с точностью лучше $7^\circ-10^\circ$ при условии успешной записи им продольной волны хотя бы от одного пенетратора.

Эффект модуляции позволяет выявить длиннопериодные колебания, модулирующие короткопериодные колебания, и таким образом зареги-

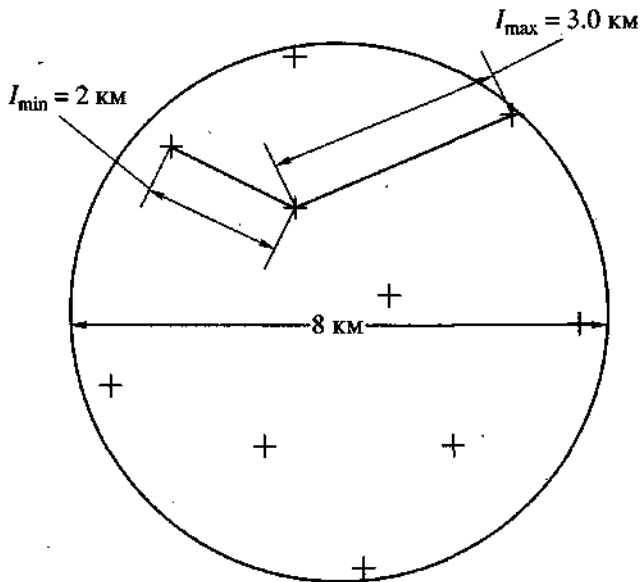


Рис. 2. Малоапертурная сейсмическая группа.

стрировать сигнал весьма низкой частоты, используя сравнительно узкополосный сейсмоприемник, чувствительный к короткопериодным колебаниям. Диапазон зарегистрированных длиннопериодных колебаний будет охватывать и спектр собственных колебаний Луны, который в зависимости от существования или отсутствия ядра должен иметь существенные отличия.

В качестве сейсмоприемного элемента малоапертурной группы предполагается использовать улучшенный аналог сейсмоприемника, разработанного для КА "Марс-96" (рис. 3).

По данным разработчиков, высокоскоростной пенетратор имеет следующие расчетные параметры:

масса в целом, кг	12
в том числе сейсмическая аппаратура, кг	3
полоса регистрации сейсмоприемника, Гц	0.5-40
чувствительность, см/Гц	10^{10}
радиотелеметрический блок и блок управления, кг	1
объем буферной памяти, мб	20
блок питания - литиевые батареи, кг	3
время функционирования, год	1
возможные перегрузки, g	до 10000
габариты:	
диаметр, см	12
длина в разных модификациях, м	1-2
угол вхождения в грунт	не менее 75°
угол атаки	$3^\circ-7^\circ$

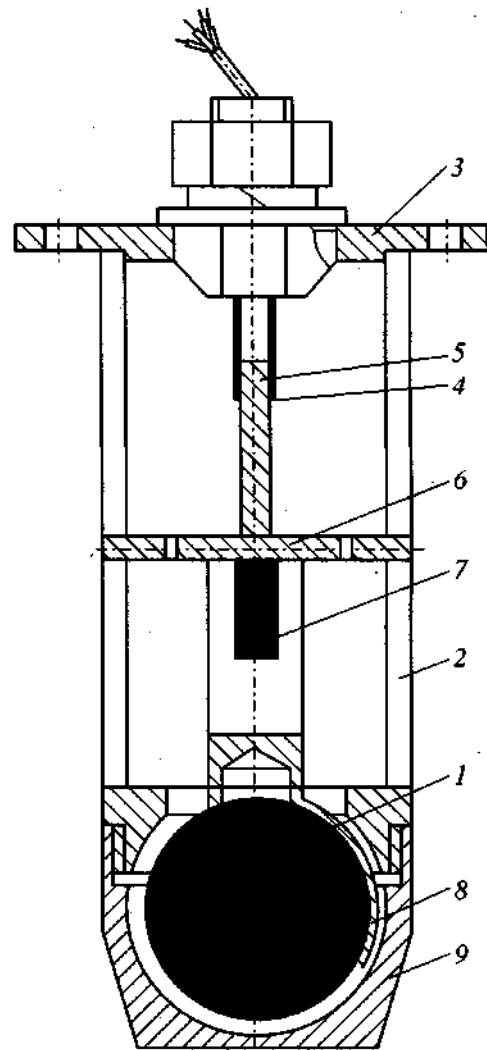


Рис. 3. Сейсмоприемник, разработанный для установки в пенетраторе по программе "Марс-96": 1 - сферическая масса, 2 — корпус, 3 - крышка, 4 - хвостовик упругого элемента, 5,6- переходник, 7 - пьезоэлектрический сенсор, 8 - лепестковая пружина, 9 - донная ловушка.

Особенность сейсмического эксперимента с созданием малоапертурной группы состоит в том, что пенетраторы сбрасываются с подлетной траектории и внедряются в грунт с высокой скоростью. В предельном случае без использования тормозного импульса эта скорость составит 2.5 км/с. При этом ожидается погружение в реголит до глубины 10-15 м. Корпусу пенетратора придается специальная форма, способствующая уменьшению перегрузки, действующей на научную аппаратуру. Хотя имеющиеся данные показывают возможность сохранения работоспособности приборов в этих жестких условиях в зависимости от результатов дальнейших испытаний возможно,

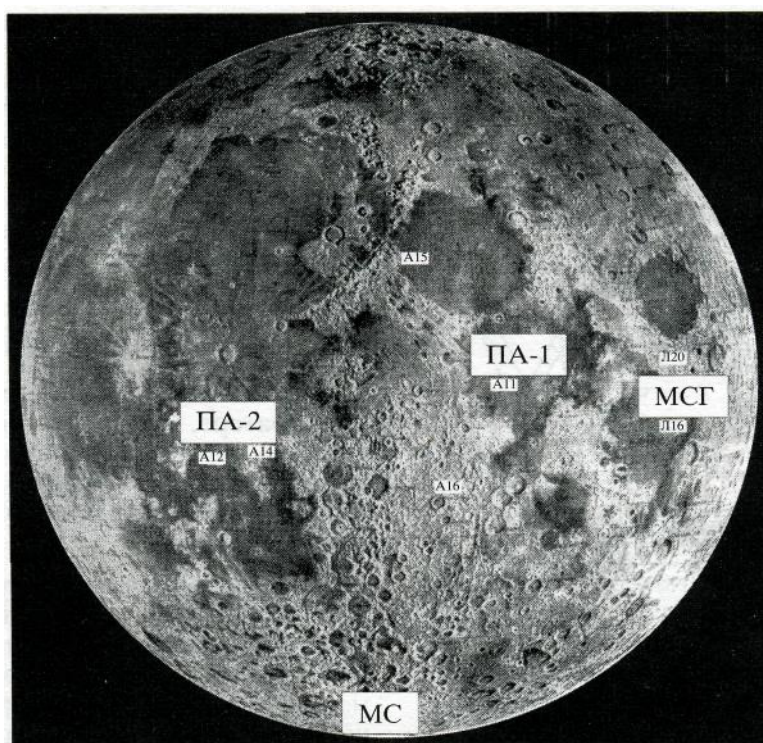


Рис. 4. Местоположение аппаратов, доставляемых на Луну в ходе планируемого эксперимента: МСГ - малоапертурная сейсмическая группа (18° ю.ш., 52° в.д.); ПА-1 - посадочный аппарат с широкополосным сейсмоприемником (7° с.ш., 23.5° в.д.); ПА-2 - то же (3° с.ш., 23.4° з.д.); МС - полярная станция (87.5° ю.ш., 38° в.д.).

придется снизить скорость внедрения пенетраторов. Связанное с этим увеличение расхода топлива делает факультативными планы исследования с орбитального аппарата и может минимизировать научное оснащение полярной станции.

Размещение малоапертурной группы на Луне желательно произвести в районе с низкой сейсмичностью и мощным слоем реголита. На видимой стороне Луны восточная часть южного полушария является наиболее сейсмически спокойной (Ламмлейн, 1977). Мощность реголита больше в материковых районах, но пересеченный рельеф делает посадку здесь более рискованной. Исследователи, занимавшиеся выбором места посадки (руководитель В.В. Шевченко), считают оптимальным осуществить размещение малоапертурной группы в южной части Моря Изобилия с центром в точке с координатами 18° ю.ш. и 52° в.д. (рис. 4).

Второй тип сейсмического эксперимента состоит в применении сейсмической станции, содержащей широкополосный сейсмоприемник.

Необходимость в использовании широкополосного сейсмоприемника, имеющего достаточно высокую чувствительность в области длиннопериодных колебаний, обусловлена особенностями упругих свойств Луны.

Исследование внутренней части Луны затруднено относительно высоким затуханием (низкими величинами добротности Q) на глубинах свыше 1000 км (Лононне, Моссер, 1993). Величина Q уменьшается от значений 1500 в низах верхней мантии Луны до менее, чем 300 на глубинах 800-1000 км. Увеличение затухания особенно быстро происходит на более высоких частотах. Если на частоте в 1 Гц оно происходит в 50 раз, то на частоте в 0.5 Гц - в 8 раз, а 0.125 Гц - всего в 2 раза.

Поэтому существенным является создание сейсмометра с высокой чувствительностью в области низких частот (рис. 5).

Примером такого прибора является французский широкополосный трехосный сейсмоприемник типа "Оптимизм", спроектированный для использования в экспедиции "Марс-96". Он имеет чувствительность, почти на два порядка более высокую, чем сейсмометр, использовавшийся в программе "Аполлон" в области частот меньше 1 Гц. Сейсмометр в модифицированном варианте способен выдержать перегрузки порядка 1000g.

Предполагается посадить два посадочных аппарата, несущих широкополосные сейсмометры этого типа.

Посадочные аппараты предполагается разместить на значительном (не менее 300 км) расстоянии друг от друга в экваториальной зоне. Целесо-

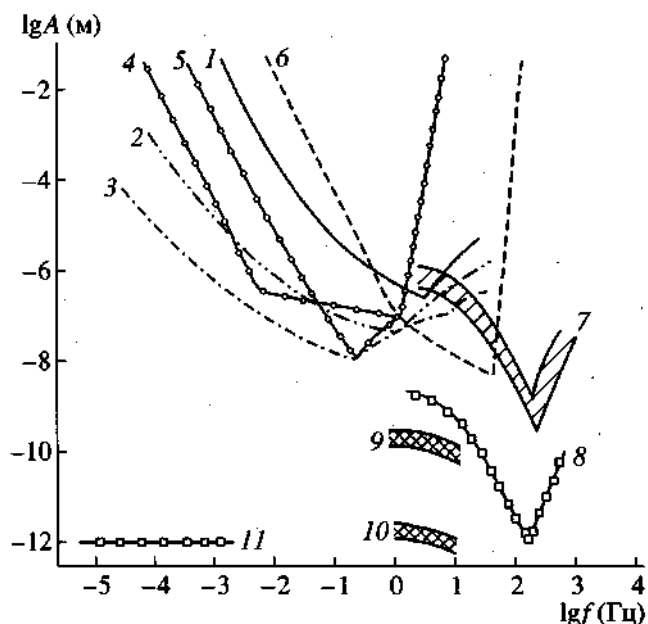


Рис. 5. Чувствительность сейсмической аппаратуры космических программ:

1 - "Викинг"; 2 - "Оптимизм" (пассивный режим); 3 - "Оптимизм" (активный режим); 4, 5 - "Аполлон", длиннопериодные сейсмометры; 6 - "Аполлон", короткопериодный сейсмометр; 7 - "Марс-96", пенетратор; 8 - "Марс-96", модификация; 9, 10 - максимальный и минимальный шум Луны соответственно; 11 - модуляционный метод "Луна-Глоб".

образно сделать это в районах мест посадок космических аппаратов "Аполлон". Выбраны пункты с географическими координатами 0.7° с.ш. и 23.5° в.д. и 3° с.ш. и 23.4° з.д., отвечающие местам посадок КА "Аполлон-Н" и "Аполлон-12" соответственно.

Состав научных приборов на полярной станции

Прибор	Масса, кг	Энергопотребление, Вт	Назначение прибора
ТВ-камера	1.5	5	Получение панорамы района посадки. Оценка минералогического состава породы. Обнаружение льда
Детектор нейтронов	0.4	2.7	Определение в породе содержания воды от $\sim 0.5\%$
Гамма-спектрометр	2.5	3.0	Определение в породе содержания H_2O и CO_2 . Определение содержания U, Th и K. Определение содержания породообразующих элементов Mg, Al, Si, Cf, Ti, Fe
Масс-спектрометр	1.5	5.0	Определение содержания в породе летучих компонентов, включая H_2O
α -р-Х-спектрометры + АМА	1.1	2.1	Определение содержания в породе легких элементов: O, Na, Mg, Al, Si и др.
Магнитометр	0.4	1	Измерение величины локального магнитного поля
Термозонд	0.3	2	Определение температуры грунта
Аксерометр	0.2	0.2	Измерение перегрузки при внедрении

Технические возможности современного сейсмондирования позволяют рассчитывать на определение границы ядра и нижней мантии Луны с погрешностью ± 20 км по глубине. Однако если велика степень горизонтальной неоднородности в зоне перехода, то неопределенность оценки может возрасти до 40-80 км. Этого достаточно для решения задачи, поставленной перед сейсмическим экспериментом.

Анализ грунта в зоне вечной тени

С целью исследования состава грунта в полярном кратере, где, в частности, возможно присутствие вымороженной воды, предполагается посадить в районе Южного полюса станцию, содержащую научные приборы для отбора и исследования грунта.

В таблице приведены перечень устанавливаемых на полярной станции научных приборов, их назначение и основные характеристики. Большая часть указанных приборов может в той или иной мере дать информацию о присутствии летучих, в частности воды, в лунном грунте в месте посадки станции. К этим приборам относятся ТВ-камера, детектор нейтронов, гамма- и масс-спектрометр.

Телевизионная камера предназначена для получения панорамного изображения места посадки станции и измерения физических характеристик грунта. С ее помощью может быть также получено представление о присутствии вымороженных летучих по ряду признаков: 1) величине альбедо; 2) отражательным характеристикам грунта при съемке в разных диапазонах длин волн; 3) значению индикатрисы отражения поверхности при освещении ее под разными углами. Ввиду затененно-

сти района посадки предполагается использовать искусственные источники освещения (осветительные ракеты, ламповые вспышки, спектральные световые диоды). В результате ТВ-эксперимента может быть получена следующая информация: 1) панорамное изображение кратера; 2) изображение поверхности радиусом 2-50 м для оценки геологической обстановки в районе посадки; 3) изображение поверхности радиусом 1-2 м для изучения структуры грунта.

ТВ-камера имеет восемь объективов, обеспечивающих горизонтальный угол обзора 360° и вертикальный - 45° . Разрешение на поверхности 2 мм на расстоянии 0.7 м. Спектральный рабочий диапазон 0.4-0.9 мкм.

Детектор нейтронов предназначен для обнаружения воды (льда) в лунном грунте. Он состоит из двух неохлаждаемых кремниевых детекторов заряженных частиц, между которыми расположен конвертор, основанный на LiF. При облучении грунта нейтронами от источника Cf^{252} нейтроны замедляются и попадают в конвертор, в котором происходит экзоэнергетическая реакция $6\text{Li} + n = 4\text{He} + 3\text{H} + 4.78 \text{ МэВ}$. Энергия нейтрона преобразуется в энергию заряженных частиц (альфа-частицы и ядра трития), которые одновременно регистрируются кремниевыми детекторами. Сигналы от них суммируются и поступают на анализатор импульсов. Чувствительная поверхность детектора составляет 5 см^2 . Нижний предел обнаружения воды (льда) составляет 0.5-1.0% по массе.

Гамма-спектрометр. При облучении породы космическими лучами возникают вторичные нейтроны, при взаимодействии которых с водородом возникают γ -кванты с энергией 2.223 МэВ.

Ввиду постоянно низкой температуры в зоне работы полярной станции возникает возможность использования без искусственного охлаждения высоко разрешающего полупроводникового детектора из сверхчистого Се с низкой рабочей температурой (ниже 130 К).

Эффективность детектора $\sim 20\%$ от NaI(Tl) на энергии 1.33 МэВ, энергетическое разрешение $\sim 2-2.5 \text{ кэВ}$ на энергии 1.33 МэВ, число каналов анализатора - 8096, емкость канала - 2^{16} импульсов. В рабочем положении детектор спектрометра располагается на расстоянии 1.0-1.5 м от корп-станции.

Теоретические оценки и экспериментальное моделирование показывают, что предел обнаружения воды составляет $\sim 1\%$ по массе.

Масс-спектрометр. Исследование состава газообразной компоненты породы поверхностного слоя Луны предполагается производить с помощью масс-спектрометра гиперболического типа. Образец анализируемой породы отбирается с помощью миниатюрного грунтозаборного устройства и помещается в камеру напуска. Эта камера

соединяется с рабочим объемом анализатора масс-спектрометра входным трубопроводом с малым поперечным сечением. Для поддержания необходимого вакуума рабочий объем анализатора с помощью выходного патрубка сообщается с открытым космосом. Камера напуска снабжена нагревателем. В результате нагрева породы в камере напуска продукты газоотделения по входному трубопроводу вводятся в рабочий объем масс-анализатора и, после исследования их состава, удаляются в космическое пространство по выходному трубопроводу. Основные характеристики прибора:

диапазон регистрируемых масс, а.е.м 1-50
динамический диапазон
(по пику 28 а. е. м.) 10^5
чувствительность прибора, см^3 10^3
разрешающая способность
на уровне 0.1 (по пику 44 а. е. м.), а. е. м. лучше 1

Другие приборы, которые предполагается устанавливать на полярной станции (α -р-Х-спектрометры, магнитометр, термозонд и акселерометр), предназначены для определения элементного состава и физических свойств грунта.

Полярную станцию предполагается посадить в затененную область в районе Южного полюса. Предполагается участок с координатами центра 88° ю.ш. 38° в.д. (В.В. Шевченко с сотрудниками). Этот участок соответствует кратеру диаметром около 56 км. Преимуществом его является относительно обширная площадь, древний возраст и положение, несколько смещенное в сторону полушария, видимого с Земли. Точность посадки $\pm 15 \text{ км}$.

Определение химического состава пород при помощи α -р-Х-спектрометра и γ -спектрометра позволяет существенно улучшить калибровку прибора, что позволит понизить в свою очередь пределы обнаружения воды до 0.2-0.5% по массе.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Космический аппарат

В соответствии с техническим заданием ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН в НПО им. А.С. Лавочкина (С.Д. Куликов, Р.С. Кремнев, К.М. Пичхадзе, В.А. Долгополов, Г.Н. Роговский и др.) были выполнены работы по определению параметров и компоновки космического аппарата и схемы полета, обеспечивающих выполнение научных экспериментов.

Рассматривались два варианта космического аппарата: (1) с использованием ракеты-носителя "Молния" и (2) ракеты-носителя "Союз" с разгонным блоком "Фрегат".

Космический аппарат состоит из (рис. 6): 1) перелетного модуля; 2) кассеты с высокоскоростными

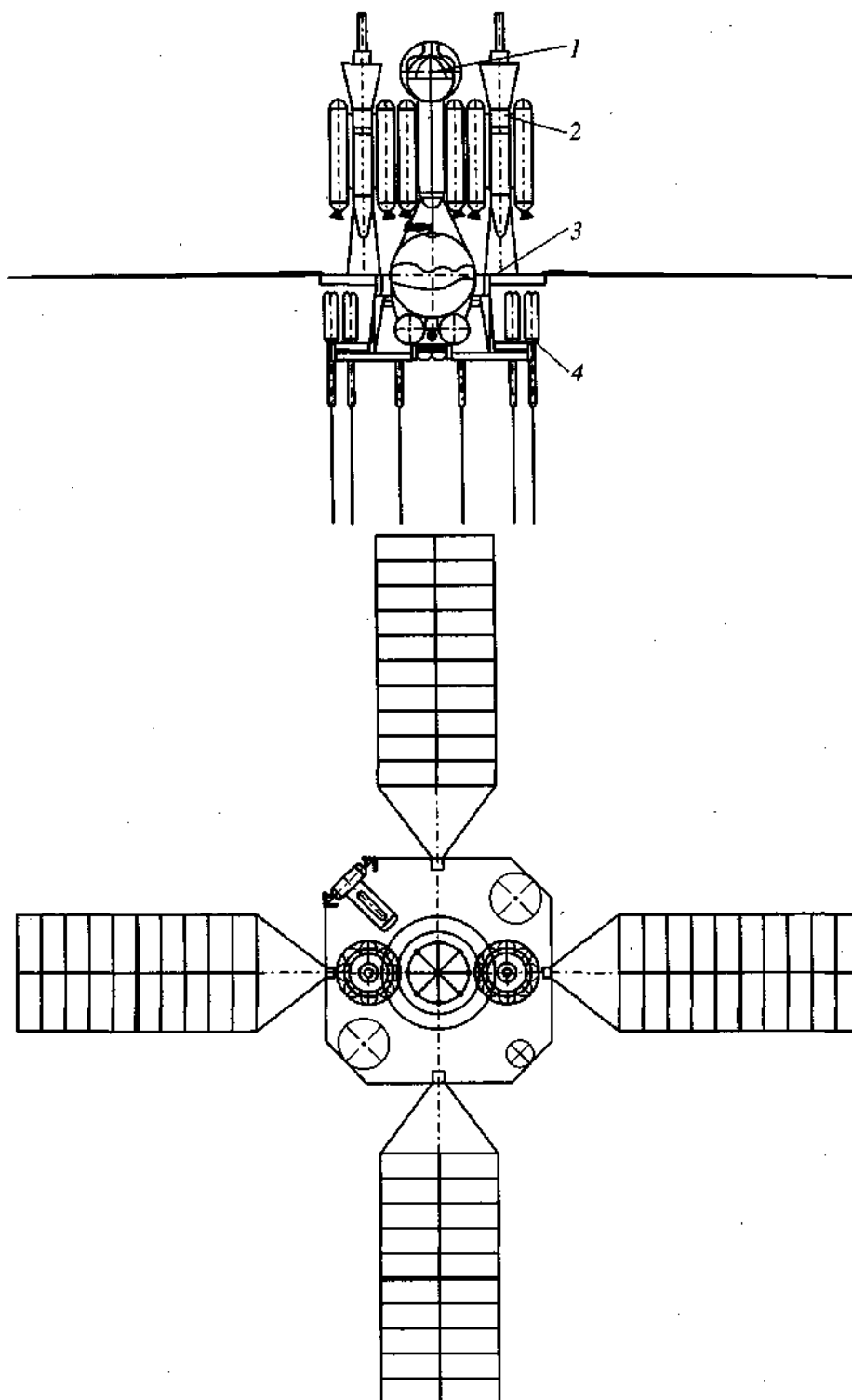


Рис. 6. Общий вид КА "Луна-Глоб": 1 - полярная станция, 2 - посадочные аппараты с широкополосным сейсмомером, 3 - перелетный модуль, 4 - кассета с высокоскоростными пенетраторами МСГ.

ми пенетраторами; 3) полярной станции; 4) двух посадочных аппаратов.

Высокоскоростные пенетраторы располагаются по периметру кольца-кассеты. Кассета снабжена программно-временным устройством, аккумуляторной батареей и пороховыми двига-

телями. В заданное время кассета отделяется от космического аппарата и закручивается симметрично расположенными пороховыми двигателями.

Полярная станция состоит из тормозного двигателя и посадочного модуля.

Тормозной двигатель обеспечивает первое торможение при сходе полярной станции с орбиты и второе торможение для гашения вертикальной скорости.

Величина перегрузки при ударе о лунную поверхность не должна превышать 500G.

Посадочные аппараты предназначены для доставки и развертывания сейсмических станций, содержащих широкополосные сейсмоприемники (рис. 7).

Посадочный аппарат состоит из тормозного модуля и пенетратора.

Пороховые двигатели обеспечивают торможение пенетратора до скорости внедрения в грунт около 80 ± 20 м/с.

Двигатели закрутки обеспечивают закрутку посадочного аппарата.

Перегрузки на научную аппаратуру при внедрении пенетратора в лунную поверхность не превосходят 500G.

Пенетратор содержит помимо научной аппаратуры системы электропитания, терморегулирования, радиопередающий блок, блок управления и антенный блок.

Перелетный модуль содержит двигательные установки, системы управления, ориентации, питания, раскрываемые штанги с солнечными панелями и исполнительные механизмы. Помимо служебных систем на перелетном модуле размещается научная аппаратура, предназначенная для исследований с орбиты спутника Луны.

*Выведение космического аппарата на траекторию к Луне.
Схема перелета и посадки*

Выведение космического аппарата производится при помощи ракет-носителей "Молния" или "Союз".

Ракета "Молния" состоит из четырех ступеней. Длина ракеты 43.4 м, максимальный поперечный размер 10 м. Стартовая масса 320 т. Три ступени ракеты-носителя позволяют выводить около 7000 кг на круговую орбиту высотой 200 км. Разгонный блок (4-я ступень) предназначен для перевода космического аппарата с промежуточной орбиты на расчетную.

Схема перелета к Луне показана на рис. 8. Время перелета к Луне составляет примерно 4.5 сут. Через 32-38 ч после старта (на расстоянии 210-260 тыс. км от Земли) производится первая коррекция, устраняющая погрешности выведения. Примерно за 29 ч до встречи космического аппарата с Луной запускается 14-часовая циклограмма. В течение первого часа проводится переориентация КА, отделение кассеты с пенетраторами и ее закрутки. Затем последовательно проводится

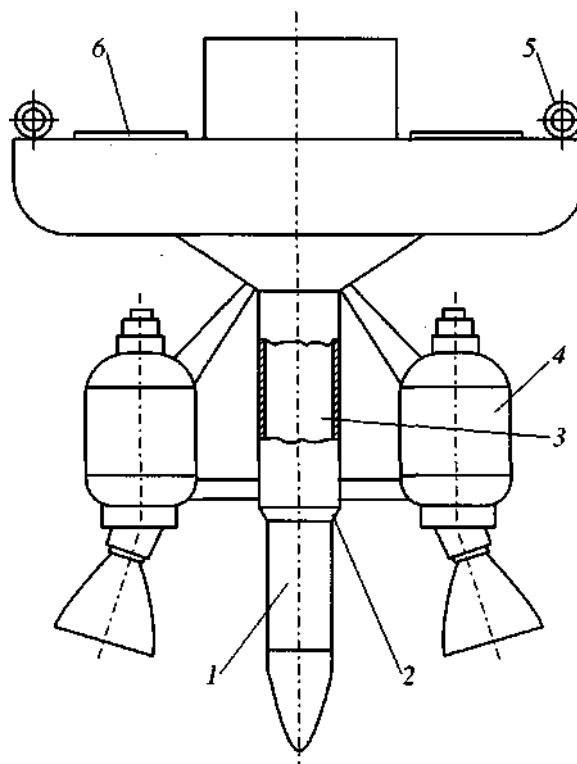


Рис. 7. Посадочный аппарат: 1 - головная часть, 2 - корпус, 3 - приборный отсек, 4 - тормозной двигатель, 5 - двигатель вращения, 6 - блок управления спуском.

переориентация КА, закрутка и отделение 1-го, а затем 2-го посадочного аппарата.

После отделения от КА кассета пенетраторов и два посадочных аппарата функционируют следующим образом.

Кассета с пенетраторами движется по попадающей траектории, вращаясь со скоростью 3 рад/с. На высоте 700 км скорость вращения увеличивается до 20 рад/с и происходит отделение пяти пенетраторов. Имея боковую скорость 20 м/с и вертикальную скорость 2.6 км/с, пенетраторы за время подлета к Луне (250 с) разлетаются по окружности круга диаметром приблизительно 10 км. На высоте 350 км отделяются остальные пять пенетраторов, которые успевают за время падения разлететься по кругу диаметром около 5 км.

Если эксперименты покажут необходимость снижения ударных нагрузок, будет введена промежуточная операция торможения кассеты с пенетраторами.

Посадочные аппараты движутся после отделения от КА по попадающей траектории. На высоте 2 км от поверхности Луны включается тормозной пороховой двигатель, который гасит скорость от 2.6 км/с до нуля. После этого тормозной двигатель сбрасывается, и пенетратор в свободном падении внедряется в грунт со скоростью 60-120 м/с.

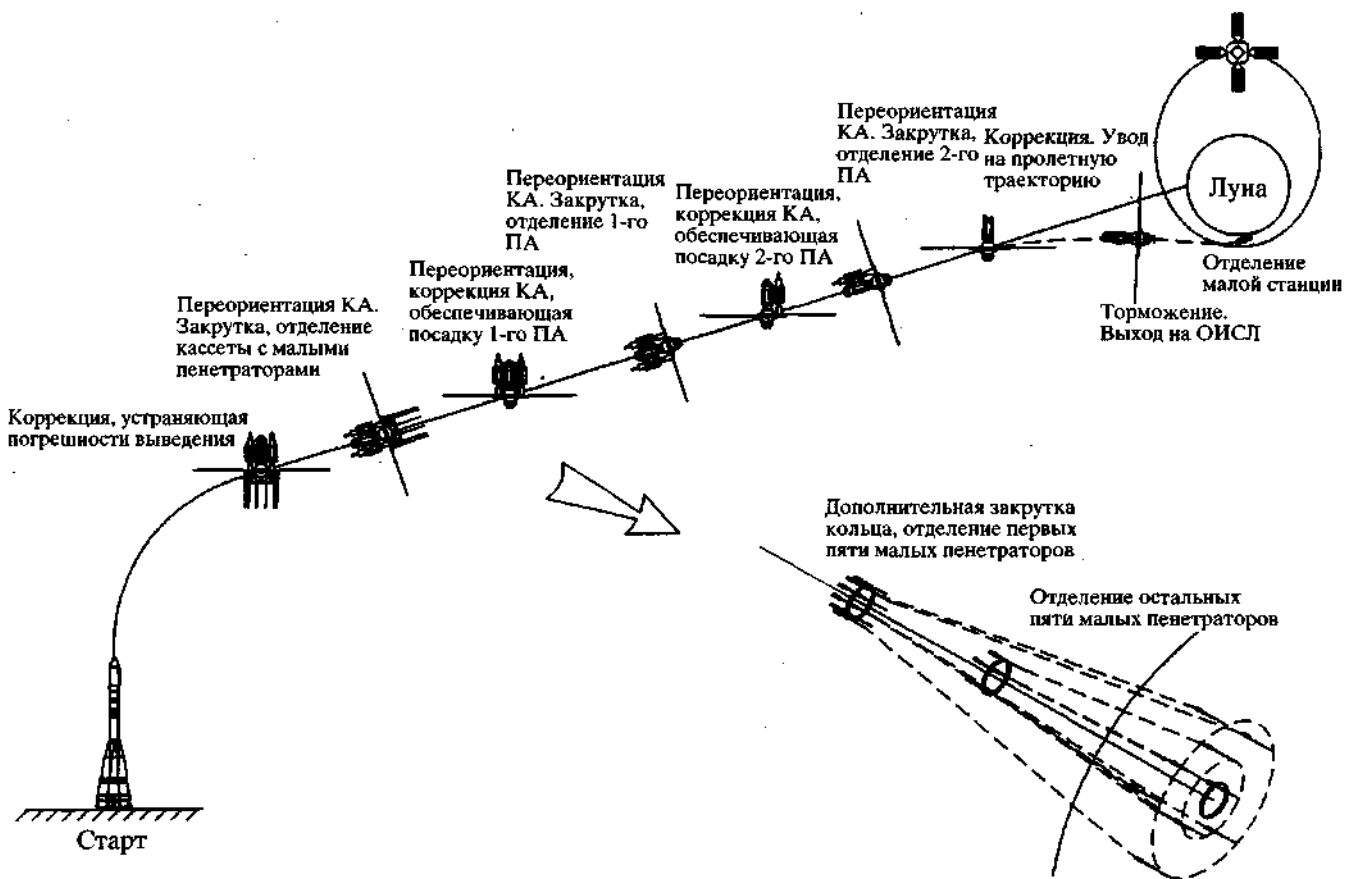


Рис. 8. Схема полета космического аппарата к Луне.

При подлете к Луне КА переводится на орбиту спутника Луны. Производится коррекция орбиты, обеспечивающая прохождение плоскости орбиты через выбранное место посадки малой (полярной) станции в район Южного полюса и нахождение перигея орбиты над местом посадки станции.

Полярная станция отделяется от КА и ее орбитальная скорость (~ 2 км/с) гасится до нуля. Станция осуществляет свободное падение с высоты приблизительно 500 км. На высоте 2 км включается тормозной двигатель, который гасит скорость станции до нуля. После этого тормозной двигатель сбрасывается, и станция падает на поверхность со скоростью ~ 80 м/с.

Орбитальный комплекс. Необходимость в орбитальном комплексе определяется необходимостью трансляции на Землю сигнала, получаемого с полярной станции. Полярная орбита лунного спутника создает условия для глобального картирования Луны. В расчетном варианте предполагается достаточно высокая орбита (около 500 км). Если дальнейшие исследования покажут возможность использования более низкой орбиты, целесообразно будет произвести картирование Луны при помощи γ -спектрометра и нейтронного спектрометра. Эти приборы были разработаны и изготовлены для экспедиции "Марс-96". Пред-

ставляют существенный интерес радиолокационные исследования с использованием м-диапазона излучений, что позволило бы оценить мощность слоя реголита на Луне. Однако возможность проведения этих исследований зависит от того, удастся ли сохранить резервы массы после обеспечения приоритетных экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задач, поставленных проектом, может привести к одному из наиболее значительных достижений в науках о Земле и планетах.

В то же время проект представляет лишь первый шаг в новом этапе исследования и освоения Луны, который сейчас наступает.

В случае, если подтвердится присутствие воды и летучих в полярной области, необходимой станет доставка образцов грунта из этого района.

В следующем веке, несомненно, актуальной станет проблема освоения Луны, в том числе и прежде всего в связи с решением проблем земной энергетики. Как упоминалось, одна из серьезных перспектив связана с использованием ресурсов лунного ^3He . Это потребует проведения обширных и длительных научно-исследовательских, геологоразведочных и горных работ на Луне. Страна, ко-

торая создаст соответствующую технологию, окажется в роли мирового технического лидера.

После неудачи с запуском КА "Марс-96" возникла необходимость пересмотра программы и стратегии планетных исследований.

В этой связи возвращение к исследованию Луны представляется наиболее своевременным и целесообразным.

Проекты исследования Луны помимо их большого научного значения имеют ряд других преимуществ:

а) они экономичны, могут быть осуществлены с использованием ракет-носителей среднего класса типа "Молния", "Союз" или конверсионных ракет с дополнительным разгонным блоком;

б) могут быть подготовлены в сжатые сроки, так как базируются на имеющемся в стране опыте исследования Луны автоматическими аппаратами;

в) не связаны с жесткими датами запуска, их проведение и тщательная подготовка не ставятся под угрозу в условиях неблагоприятного или не систематического финансирования;

г) могут быть использованы для тщательной отработки более дорогостоящих экспедиций к удаленным телам Солнечной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арнольд* (Arnold J.R.). Ice in the Lunar Polar Regions // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 5656-5667.
- Боярчук А.А., Рускол Е.Л., Сафронов В.С., Фридман А.М.* Происхождение Луны: спутниковый рост или мегаимпакт // Докл. Акад. Наук. 1998. Т. 361. №4. С.481-Ф84.
- Вассон, Уоррен* (Wasson J.T., Warren P.H.). Formation of the Moon from differentiated planetesimals of chondritic compositions // Lunar Planet. Sci. X. Houston: Lunar Planetary Institute, 1979. P. 1310-1312.
- Вейденшиллинг и др.* (Weidenschilling S.J. et al.). Origin of the Moon from a circumterrestrial Swarm // Proc. Conf. on the Origin of Moon. Houston: Lunar Planetary Institute, 1986.
- Галимов* (Galimov E.M.). Several consideration on the early history of the Earth // From mantle to meteorites / Eds Gopalan K. et al. Festschrift for Davendron Lai. Bangalore: Indian Academy Sciences, 1990. P. 177-188.
- Галимов* (Galimov E.M.). Problem of The Origin of the Moon // Geochem. Intern. 1996. V. 33. No 4. P. 6-48.
- Камерон, Уорд* (Cameron A.G.W., Ward W.R.). The origin of the Moon // Lunar Science VII, Houston: Lunar Planetary Institute, 1976. P. 120-122.
- Кусков, Фабричная* (Kuskov O.L., Fabrichnaya O.B.). Constitution of the Moon. 2. Composition and Seismic Properties of the Lower Mantle // Phys. Earth Planet. Intern. 1994. V. 83. P. 197-216.
- Ламмлейн* (Lammlejn D.). Lunar seismicity and tectonics // Phys. Earth. Planet. Intern. 1977. V. 14. P. 224-273.
- Лонноне, Моссер* (Lognonne Ph., Mosser B.). Planetary seismology // Surreys in Geophysics. 1993. V. 14. P. 239-302.
- Накамура* (Nakamura Y.). Seismic velocity structure of the lunar mantle // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. P. 677-686.
- Рускол Е.Л.* Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 188с.
- Хаврошкин, Циплаков* (Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V.). Penetrator "MARS-96": Reality and possibilites of seismic experiment. М.: UIPE, 1996. 36 p.
- Хартман, Девис* (Hartman W.K., Devis D.R.). Satellite seized planetesimals and lunar origin // Icarus. 1975. V. 24. P. 504-515.
- Худ* (Hood L.L.). Geophysical Constraints on the Lunar Interior. Origin of the Moon / Eds Hartman W.K. et al. Houston: Lunar Planet. Inst., 1986. P. 361^10.
- Шумейкер и др.* (Shoemaker E.M., Robinson M.S., Eliason E.M.). The South Pole Region of the Moon as Seen by Clementaine // Science. 1994. V. 266. P. 1851-1854.