

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

2/1978

СЕРИЯ
КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

С.В. Викторов
В.И. Чесноков

ХИМИЯ ЛУННОГО ГРУНТА



НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

Серия «Космонавтика, астрономия»
№ 2, 1978 г.
Издается ежемесячно с 1971 г.

С. В. Викторов,

В. И. Чесноков,

кандидаты физико-математических наук

ХИМИЯ ЛУННОГО ГРУНТА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1978

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Гипотезы об образовании, строении и составе лунной поверхности	6
Методы измерения химического состава вещества Луны	12
Измерения с орбиты искусственных спутников Луны	20
Измерения с помощью аппаратов «Сервейер»	29
Рентгеновский флуоресцентный метод: «Луноход-1»	35
Рентгеновский флуоресцентный метод: «Луноход-2»	45
Исследование доставленных на Землю образцов	54
Заключение	59

Викторов С. В. и Чесноков В. И.

- В 43 Химия лунного грунта. М., «Знание», 1978.
64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Космонавтика, астрономия», 2. Издается ежемесячно с 1971 г.)

В исследованиях химического состава грунта Луны, а в перспективе и планет Солнечной системы особое место занимает рентгеновский изотопный флуоресцентный метод анализа (РИФМА). В брошюре участники создания аппаратуры РИФМА, используемой при работе советских «Луноходов», рассказывают о физических основах этого метода, а также приводят результаты химического анализа лунного грунта, полученные с помощью как данного, так и других методов, применявшихся, в частности, при работе некоторых американских автоматических станций.

Брошюра рассчитана на студентов и преподавателей вузов, учителей средних школ, а также на более широкий круг читателей, интересующихся современными достижениями в области космических исследований.

20604

528

ВВЕДЕНИЕ

Что собой представляет Луна? Этот вопрос с древнейших времен волновал человека. Однако в течение длительного времени ряд причин, в том числе и различные суеверия, связанные с Луной, мешали научному подходу к ее изучению. Широкие и разносторонние научные исследования Луны — ближайшего к нам небесного тела — начались сравнительно недавно. Истина давалась не сразу — каждое открытие порождало сразу же много новых вопросов.

Что касается размеров Луны, ее массы, средней плотности и ряда других параметров, то они, как оказалось, довольно точно определяются методами небесной механики. Методы радиоастрономии дают возможность оценить теплопроводность и плотность поверхностного слоя Луны. Однако химический состав вещества, слагающего лунную поверхность, удалось исследовать лишь в последние годы.

Существует целый ряд непрямых (неконтактных) методов исследования химического состава небесных тел. Одним из них является метод спектрального анализа, широко применяющийся в астрофизике. Свет, идущий к нам от Солнца и далеких звезд, несет богатую информацию о составе поверхностных слоев этих небесных тел и происходящих в них процессах. Однако этот весьма чувствительный метод астрофизики не может быть использован для исследования состава лун-

ного грунта, поскольку Луна светит лишь отраженным от нее солнечным светом. Поэтому исследования химического состава лунного грунта стали возможными только в космическую эпоху, когда началось изучение Луны с помощью научных приборов, доставляемых автоматическими и пилотируемыми космическими аппаратами как на лунную поверхность, так и на орбиту ее искусственного спутника.

В данной брошюре будет рассказано о ядерно-физических методах исследования химического состава лунного грунта, используемых при работе космических аппаратов, а также о результатах исследования лунного грунта, полученных как с помощью этих, так и других методов. Но вначале вспомним, что знали о Луне в «докосмическую» эпоху и до непосредственных измерений на ее поверхности.

Видимая с Земли невооруженным глазом поверхность Луны уже в IV в. до н. э. навела ученых Древней Греции на мысль, что там есть горы и равнины. Первая из дошедших до нас научных работ о Луне относится к I в. н. э. Но естественно, что сведения о Луне, полученные лишь путем ее наблюдений невооруженным глазом, многого дать не могли.

Новый период в изучении Луны начался в XVII в. с изобретением телескопа. В 1610 г. Галилей, наблюдая Луну в телескоп, увидел на ее поверхности горы и «моря». «Морями» он назвал обширные темные области, которые показались ему большими водными бассейнами. С тех пор вот уже более трех столетий ведется изучение Луны с помощью оптических инструментов. Составляются все более и более подробные карты Луны. В конце XIX в. были получены первые фотографии Луны, и вскоре был выпущен первый ее фотографический атлас.

В первой половине XX в. началось изучение Луны астрофизическими методами, с помощью которых были выполнены обширные исследования отдельных образований лунного рельефа и других характеристик лунной поверхности. В середине нашего столетия пришел черед радиоастрономических методов. К этому времени были созданы мощные радиотелескопы направленного действия, обладающие высокой чувствительностью. Первая радиолокация Луны была осуществлена в 1946 г., и с тех пор радиолокационные исследования нашего

естественного спутника проводились неоднократно. С их помощью была получена ценная информация о движении Луны и ее размерах, удалось определить среднее расстояние до Луны с точностью до нескольких сотен метров, уточнить ее массу и среднюю плотность.

В исследовании лунной поверхности с помощью наземных средств огромное значение отводится радиофизическим измерениям, большой цикл которых был осуществлен в СССР под руководством В. С. Троицкого. Полученные в результате радиофизических измерений данные позволили сделать вывод, что самый верхний слой лунного грунта является пористым или распыленным веществом с весьма низкой теплопроводностью. Были сделаны оценки плотности и температуры лунного грунта, теплового потока, идущего из недр Луны к ее поверхности, и ряда других параметров.

Эпоха изучения Луны космическими средствами началась 2 января 1959 г., когда в Советском Союзе был произведен запуск станции «Луна-1» с массой 360 кг — первого космического аппарата, отправленного в сторону Луны. Сблизившись с Луной 4 января, станция прошла от нее на расстоянии около 6000 км и стала первым в мире искусственным спутником Солнца. С помощью научной аппаратуры были получены данные о радиационной обстановке и газовой составляющей межпланетного вещества в окололунном пространстве.

Исследования, начатые «Луной-1», в этом же году были продолжены станциями «Луна-2 и -3». Научная аппаратура «Луны-2» — станции, впервые в мире достигшей поверхности другого небесного тела, — позволила установить, что на Луне отсутствует сколько-нибудь заметное магнитное поле, нет и радиационных поясов. С помощью аппаратуры, установленной на «Луна-3», были получены первые снимки обратной стороны Луны, не видимой с Земли. Сделанные на расстоянии 60—70 тыс. км от лунной поверхности, они дали первые представления о большей части этой стороны Луны.

Изучение Луны впоследствии было продолжено с помощью советских автоматических станций серии «Зонд» и «Луна», а также американских — серии «Пионер» и «Рейнджер». В результате проведенных научных исследований была получена ценная научная информация, в частности, она позволила советским ученым со-

ставить первую полную карту и первый глобус Луны. Однако вопросы о природе и прочности лунного грунта, о возможности мягкой посадки на ее поверхность и ряд других оставались открытыми.

Следующий этап исследования Луны начался в феврале 1966 г., когда была решена одна из важнейших проблем практической космонавтики — осуществлена мягкая посадка на поверхность другого небесного тела. Станция «Луна-9», совершившая впервые в мире мягкую посадку на Луну, передала на Землю уникальные панорамы лунного ландшафта в районе посадки, а также произвела измерения интенсивности радиации, обусловленной воздействием космических лучей и излучением лунного грунта. Продолжительность активного существования станции на поверхности Луны составила 75 ч.

В декабре этого же года примерно в 400 км от места посадки «Луны-9» совершила мягкую посадку станция «Луна-13». С помощью аппаратуры «Луны-13» были проведены исследования физико-механических свойств лунного грунта. Кроме того, измерялся тепловой поток и корпускулярное излучение вблизи лунной поверхности.

В июне 1966 г. в США была запущена станция «Сервейер-1», также осуществившая мягкую посадку на поверхность Луны, а затем и ряд других станций этой серии, продолживших изучение лунной поверхности. Три последних аппарата этой серии («Сервейер-5, -6 и -7») имели в составе научной аппаратуры прибор для определения содержания ряда химических элементов в веществе грунта поверхности Луны. Этим было положено начало измерению химического состава лунного грунта непосредственно на поверхности Луны. Но прежде чем перейти к изложению методов измерений и полученных с их помощью результатов, кратко остановимся на существовавших тогда гипотезах о строении и составе лунной поверхности.

ГИПОТЕЗЫ ОБ ОБРАЗОВАНИИ, СТРОЕНИИ И СОСТАВЕ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Является ли лунная поверхность твердой или предмет, помещенный на нее, будет проваливаться в многометровом слое пыли? Схож ли химический состав по-

верхности Луны с составом Земли, в котором преобладают окислы кремния, алюминия, магния, калия, кальция и железа? Какие вообще химические элементы и их соединения могут встретиться на Луне? Эти и другие чрезвычайно волновавшие ученых вопросы долгое время не получали однозначных ответов. Однако на основе наземных оптических, инфракрасных и радиолокационных измерений был выдвинут ряд гипотез относительно химического состава и физико-механических свойств слагающего лунную поверхность вещества и длительного процесса формирования лунного рельефа.

Большое распространение, например, получила гипотеза, в которой учитывался тот факт, что у Луны нет атмосферы, а следовательно, на ней отсутствуют процессы выветривания. Основываясь на этом, многие ученые (в частности, советские ученые А. В. Хабаков и Н. П. Барабашов) предполагали, что наблюдаемая нами поверхность Луны представляет собой совершенно свежую, ничем не покрытую и ничем не измененную поверхность тех магматических пород, из которых образовались верхние слои лунной коры. Развивая далее эту гипотезу, ученые основывались на данных геохимии и, в частности, приходили к заключению, что темные участки лунной поверхности («моря») сложены породами, бедными кремнием (например, базальтами), а светлые участки («материки») образованы породами кислого состава¹.

Кроме того, относительно гладкая поверхность «морей» и дна некоторых круглых кратеров (цирков), по мнению ученых, должна представлять собой излившуюся несколько позже и застывшую лаву (основного состава). Причем обильное выделение газов при излиянии этой лавы могло придать пористое строение теперешней (застывшей) ее поверхности (подобно пемзе и шлаку). В то же время аналогия с земной вулканиче-

¹ В зависимости от того, какие химические элементы и в каком относительном количестве содержатся в горных земных породах, последние согласно геохимической терминологии подразделяют на следующие типы (составы): ультраосновные (дуниты), основные (например, базальты, габбро), кислые (например, граниты) и осадочные (глины, сланцы). Экспериментально установлено, что кислые породы чаще всего являются светлыми, а основные (особенно ультраосновные) — темными.

ской деятельностью приводила к предположению о возможном наличии на Луне рыхлых продуктов деятельности лунных вулканов, таких, как пепел, туф.

Однако поскольку наблюдаемые участки лунной поверхности в среднем темнее всех известных типов земных пород, то полная аналогия между лунными и магматическими земными породами оказалась невозможной. И для спасения рассматриваемой гипотезы понадобился ряд дополнительных предположений. В частности, было выдвинуто предположение о возможном изменении окраски минералов под действием солнечной радиации и космических лучей. Проведенные лабораторные исследования действительно показали, что некоторые земные минералы темнеют при их облучении. На основании этого было сделано заключение: что чем темнее та или иная деталь наблюдаемой лунной поверхности, тем она и старше. Кроме того, оценки показали, что за 1 млрд. лет космического облучения потемнение могло охватить слой лунной поверхности толщиной в несколько сантиметров.

В связи с этим привлекло к себе внимание интересное и еще малоизученное явление «защитной корки» на поверхностях отдельных скальных пород пустынных районов Земли. Она представляет собой темно-бурую (или черную) пленку, состоящую из окисей марганца и железа, а также из кремния и образующуюся под действием длительного излучения Солнца. Указанное явление, по мнению советского ученого В. В. Шаронова, подтверждает возможность потемнения лунных пород в результате их длительной «обработки» солнечной радиацией.

Следует отметить, что наружный покров лунной поверхности независимо от его происхождения и состава действительно подвергается длительному воздействию различного вида облучений. Если первичная горная порода Луны содержала достаточное количество углерода, азота и кислорода, то облученный материал должен был обладать сильным поглощением в видимой области спектра. Именно этим обстоятельством, а также наличием очень пористой структуры пород можно объяснить низкую отражательную способность (альбедо) и малую теплопроводность вещества лунной поверхности. Кроме того, поскольку внешний покров Луны в силу этих обстоятельств должен быть химически не-

устойчив, то происходящие в нем химические реакции, могли бы, в частности, быть причиной исчезновения остатков атмосферы, наличие в отдаленные времена которой (как и гидросферы) предполагалось многими учеными.

Вместе с тем рассматриваемая гипотеза не могла полностью удовлетворить ученых, поскольку все ее предпосылки основывались на чисто внешней аналогии между земными и лунными породами. Кроме того, принадлежность к тому или иному типу пород определялась по их окраске, в то время как окраска пород столь чувствительна к внешним, весьма различным на Луне и Земле факторам, что путь прямых аналогий не мог привести к надежным результатам. Поэтому наряду с этой гипотезой выдвигались и другие.

Так, например, американский ученый Р. Кларксон предположил, что на Луне преимущественную распространенность имеют осадочные породы, поскольку, по его мнению, в некоторый период прошлого Луны на ней существовали настоящие моря и океаны. В связи с этим обсуждалась роль морского прибоя в разрушении кратеров, расположенных по окраинам морей, а на месте крупных цирков предполагалось существование в прошлом озер. Более темная окраска теперешних лунных «морей» и дна цирков объяснялась в рамках этой гипотезы с помощью существующих там осадочных пород типа глин, песчаников и сланцев. Однако большинство ученых восприняли предложение Р. Кларксона как слишком экзотическое, так как наличие в прошлом воды на Луне было весьма маловероятным.

Большее распространение получила гипотеза о том, что наблюдаемая с Земли поверхность Луны состоит из веществ, возникших в результате разрушения материнских коренных горных пород под действием различных внешних факторов: гипотетической атмосферы, солнечного облучения, перепадов температуры и, может быть, действия воды. Под влиянием этих факторов на Луне должны происходить окисление горных пород и гидролиз минералов, а также ряд других химических превращений. Для протекания этих процессов требуется наличие на Луне воды, свободного кислорода и углекислого газа, которые могли образоваться либо из гипотетической древней лунной атмосферы, либо в результате вулканической деятельности. Опять же на-

личие в далеком прошлом воды, а также атмосферы на Луне многие ученые считают очень маловероятным, но тем не менее как положительный момент следует отметить, что перепады температур на Луне действительно существуют и должны играть определенную роль в геохимической эволюции лунных пород.

Рассмотрим теперь ряд гипотез, которые основывались на предположении о наличии на Луне пылевого слоя. Согласно одной из них, предложенной американским ученым Т. Голдом, на Луне должен существовать значительный пылевой покров, возникший за счет разрушения горных пород под действием солнечного излучения (из-за разрушения кристаллической решетки минералов) и бомбардировки метеоритов (из-за измельчения коренных пород). В связи с этим лунная пыль по своему химическому составу должна быть в основном аналогичной горным породам, при разрушении которых она образовывалась, но, конечно, с учетом метеоритного вещества.

Предположение о том, что поверхность Луны покрыта пылью, позже подтвердилось. Однако относительно роли Солнца и метеоритов в образовании пылевого слоя на лунной поверхности до сих пор пока нет единого мнения. Интересно в связи с этим отметить схему образования метеоритно-пылевого слоя, предложенную американским ученым Г. Юри. По его мнению, Луна образовалась из холодного метеоритоподобного материала и никогда не была полностью расплавленным телом. Огромную роль в истории Луны сыграли, как считал Г. Юри, ее столкновения в далеком прошлом с гипотетическими планетоподобными телами — планетозималями, в результате чего должно было образоваться большое количество пылевого материала, а также воды и газов (причем процессы расплавления носили локальный характер). На формирование поверхностных слоев значительное влияние, по мнению американского ученого, оказывали метеориты, падение которых на Луну в период ее позднейшей истории сопровождалось взрывными явлениями и переплавлением вещества. В частности, Г. Юри полагал, что круглые лунные «моря» образовались в результате столкновений с планетозималями, и поэтому поверхность «морей» должна состоять из переработанного вещества крупных метеоритных тел, тогда как «материки» и ва-

лы кратеров — из горных пород, по составу близких к базальту.

Экспериментальные исследования химического состава лунной поверхности, проведенные в настоящее время, не подтвердили гипотезу Г. Юри — на Луне не обнаружены породы, сходные по своему составу с метеоритами. Однако возможная роль метеоритов в формировании рельефа лунной поверхности сейчас подробно обсуждается. В частности, получила известность «метеоритно-шлаковая» гипотеза строения и происхождения покрова Луны, предложенная и подробно разработанная советским астрономом Н. Н. Сытинской.

Как известно, при каждом падении метеорита на поверхность Луны возникает своеобразный взрыв. Если скорость метеорита (в момент столкновения) составляет несколько десятков километров в секунду, то выделяемое при этом тепло полностью обращает в пар не только сам метеорит, но и часть вещества лунного грунта, находившегося вблизи падения (причем масса испарившегося лунного вещества может в несколько тысяч раз превосходить массу метеорита). По мнению Н. Н. Сытинской, конденсация испарившегося материала должна происходить таким образом, что на месте падения метеорита образуется не пыль, а нечто похожее на гранулы пористой массы — ноздреватые, слипшиеся и спекшиеся образования темного цвета. По своему внешнему виду они должны напоминать шлаки, возникающие на поверхности лавы при ее извержении из земных вулканов (отсюда и название данной гипотезы).

Итак, мы рассмотрели несколько гипотез об образовании, строении и составе лунного грунта. Согласно им поверхность Луны может состоять из самых разнообразных горных пород — от основных до кислых и осадочных (и даже метеоритноподобных). Таким образом, определенного ответа на вопрос, какие химические элементы и в составе каких пород (в земных аналогах) могут встретиться на Луне, существовавшие тогда данные наблюдений и основанные на них гипотезы дать не смогли. Химический состав лунного грунта так и продолжал оставаться загадкой для ученых, решение которой стало возможным лишь после экспериментальных исследований, проведенных с помощью ракетно-космической техники.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЕЩЕСТВА

Прогресс ракетно-космической техники позволил осуществить желания многих ученых провести непосредственные исследования химического состава вещества лунной поверхности — «почвы» Луны. При этом стали возможны три вида исследований: 1) исследование общих, глобальных характеристик поверхности с помощью приборов, расположенных на искусственных спутниках Луны; 2) непосредственное изучение состава Луны с помощью приборов, доставленных на ее поверхность; 3) анализ образцов лунного грунта, доставленных на Землю.

Что же конкретно предстояло изучить? Во-первых, нужно было определить химический состав вещества лунной поверхности и сравнить его с составом Земли, метеоритов и Солнца. Во-вторых, предстояло исследовать роль внутренних (излияние лавы, движение коры) и внешних (удары метеоритов, солнечное облучение) процессов в создании современного рельефа лунной поверхности, и, конечно же, ученых прежде всего интересовало, похожи ли по своему составу лунные и земные породы.

Классификация типов земных пород, упомянутая выше (см. сноску на стр. 7), исходит из различного содержания в этих породах наиболее распространенных химических элементов — кислорода, натрия, магния, алюминия, кремния, серы, калия, кальция, титана и железа, которые называются основными породообразующими элементами (их суммарное содержание в любых земных породах достигает 99%).

Определение концентраций основных породообразующих элементов позволяет однозначно отнести образец к типу каменных метеоритов или к какому-либо типу земных горных пород. Однако обязательно ли для этого измерять концентрации всех десяти перечисленных элементов? Ведь произвести химический анализ поверхности другого небесного тела — очень сложная научно-техническая задача. Нельзя ли упростить ее и свести число измеряемых элементов к минимально необходимому?

Для этого надо было выяснить, какие же химические элементы являются наиболее «представительны-

ми» в том или ином типе породы. Как оказалось, в ряде случаев существенную информацию может дать отношение концентраций различных элементов, среди которых наиболее «представительными» являются магний, алюминий, калий, кальций и железо. Другие элементы представлены в лунных породах в значительно меньших количествах.

Именно содержание этих элементов в лунном грунте и предстояло измерить в первую очередь. Естественно, что выбор метода измерений определялся требованиями, диктуемыми особенностями современного лунного космического эксперимента. На рассматриваемом этапе такой метод должен был обеспечить быстрое и многократное получение информации при полной автоматизации всех процессов анализа, причем в таких условиях, когда анализируемая поверхность является абсолютно неподготовленной.

На Земле обычно процедура химического анализа состоит из нескольких этапов. Самый начальный — подготовка образца, который в зависимости от метода анализа либо взвешивают и измельчают, либо прессуют в таблетку, а иногда шлифуют или делают тонкие срезы. Идентичность подготовки всех образцов обеспечивает возможность достижения высокой точности анализов и является обязательным условием анализа в земных лабораториях. Совсем другое дело — анализ грунта непосредственно на Луне: грунт неровный, на поверхности видны комки слипшихся частиц, то и дело попадаются камни самых разных размеров (геологи называют это как «грунт в естественном залегании»). Поэтому надо было искать метод, не требующий подготовки образцов, и на его основе создать надежную и легкую аппаратуру с минимальным энергопотреблением.

Требования к этой аппаратуре были очень жесткими. Она должна была переносить весь комплекс вибрационных и ударных нагрузок в период старта ракеты с Земли и в момент доставки прибора на поверхность Луны, а также должна работать в условиях интенсивного космического облучения, глубокого вакуума и резких температурных перепадов (от -150°C в течение двухнедельной лунной ночи до $+130^{\circ}\text{C}$ в дневной период).

Учитывая все эти требования, рассмотрим теперь существующие методы химического анализа и обсудим вопрос о применимости того или иного метода при космических экспериментах непосредственно на поверхности Луны.

К классическим, «мокрым», химическим методам относят те, в которых используются специальные аналитические реакции: по результатам этих реакций судят о наличии (в том числе и количестве) или отсутствии искомого химического элемента. Иногда (при так называемом весовом анализе) определяемый элемент осаждается в виде практически нерастворимого соединения (или простого вещества), отделяется от раствора (фильтрованием, промывкой, сушкой) и взвешивается, а затем по весу осадка рассчитывается количество искомого элемента. Кроме того, можно использовать электролиз, когда определяемый элемент под воздействием постоянного электрического тока выделяют при определенных условиях на электроде. Объемный (титриметрический) анализ основан на применении водного раствора с точно известной концентрацией растворимых реактивов. Применяются также физико-химические способы анализа: колориметрия (изменение интенсивности окраски цветного соединения, получаемого по аналитической реакции), турбидиметрия, нефелометрия (изменение интенсивности света, проходящего через суспензию осадка, полученного в результате аналитической реакции, или рассеянного им), полярографические и адсорбционные методы.

Очевидно, что для проведения анализа грунта этими классическими методами непосредственно на поверхности Луны пришлось бы доставить туда целую лабораторию с хрупкими пробирками, колбами, мензурками, спиртовками, весами и т. д. На Земле каждый анализ проводит квалифицированный химик-аналитик в течение нескольких часов, на Луне все операции должен делать автомат, а они с трудом поддаются автоматизации. Поэтому классические методы с самого начала оказались непригодными для лунных исследований.

Широкое распространение как метод качественного и количественного анализа состава вещества в земных лабораториях получил спектральный оптический анализ. Этот метод подразделяется на два вида (в зависимости от характера используемых спектров). Для

анализа спектральных линий излучения, называемых иногда эмиссионными, характерны следующие операции: 1) подготовка образца к анализу, 2) введение его в пламя или воздействие на него электрическим разрядом (для перевода в газообразное состояние и возбуждения свечения с появлением необходимых для анализа спектральных линий), 3) определение спектра и расшифровка соответствующих линий. При этом обычно применяют газовое пламя, дающее температуру до 3000°C . Для другого вида спектрального анализа — по линиям поглощения — пользуются спектрографами со специальными осветительными системами и приемниками, причем объектом непосредственного исследования служат растворы.

Уже из перечисленного ясно, что оба эти вида не удовлетворяют требованиям к космическим экспериментам, так как требуют значительного энергопотребления и не поддаются автоматизации. Кроме того, оптические спектры весьма сложны при расшифровке, а их передача непосредственно на Землю или хранение на борту космического аппарата весьма затруднительны.

Используется на Земле и метод масс-спектрометрического анализа, в результате которого измеряют массы ионизированных атомов и молекул посредством разделения ионов (с разным отношением массы к заряду) в электрическом и магнитном полях. Масс-спектрометрический метод является наиболее полным и точным. К тому же он представляет собой самый прямой метод химического анализа вещества. В случае приемлемого решения проблемы перевода атомов грунта в ионизованное состояние и создания достаточно компактной аппаратуры применение масс-спектрометрического анализа было бы весьма перспективным при исследовании грунта на поверхности Луны. По-видимому, именно метод масс-спектрометрического анализа будет использоваться на последующих этапах освоения Луны, когда станет возможным, с одной стороны, посылать приборы большего веса, потребляющие большую мощность, с другой — будет достигнут существенный прогресс в создании точных масс-спектрометров.

Использование радиоактивности положено в основу метода химического анализа, называемого активационным. При этом используются ядерные реакции, в результате которых атомы исследуемого образца стано-

вятся радиоактивными, и по характеристикам их распада (период полураспада, тип радиоактивного излучения и его спектр) осуществляется идентификация элементов, присутствующих в образце. В качестве первичных частиц, вызывающих необходимую реакцию, употребляются нейтроны, а также (иногда) гамма-излуче-

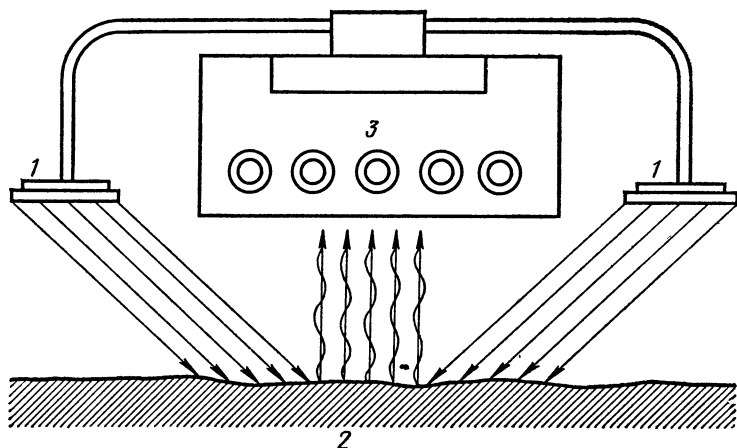


Рис. 1. Принцип работы прибора, основанного на методе рентгеновского флуоресцентного анализа: 1 — панели с радиоактивными источниками; 2 — исследуемый грунт; 3 — блок детекторов флуоресцентного излучения

ние и заряженные частицы (такие, как протоны и дейтроны). В качестве источников нейтронов применяются реакторы, ускорители различных типов и радиоактивные источники (последние, однако, дают небольшой поток нейтронов). Детекторами в этом методе химического анализа служат счетчики заряженных частиц. Хотя активационный анализ зарекомендовал себя как точный и быстрый метод химического анализа в промышленных и лабораторных условиях, его применение в космических экспериментах требует решения проблемы создания надежно работающего нейтронного источника большой интенсивности, а также преодоления трудностей при передаче и обработке сложных спектров ядерных излучений.

Перейдем теперь к методу рентгеновского спектрометрического анализа химического состава и рассмот-

рим одно из перспективных его направлений — так называемый «радиоизотопный флуоресцентный анализ».

Если взять радиоактивный источник и с его помощью облучить какое-либо вещество (рис. 1), то под воздействием внешнего излучения произойдет перестройка внешних оболочек атомов. Сначала атомы перейдут в возбужденное состояние, характеризующееся избытком их энергии, но поскольку такое состояние неустойчиво, то через доли секунды атомы освободятся от избыточной энергии, испустив кванты рентгеновского излучения. Это явление называется флуоресценцией.

Примечательно, что энергия кванта для данного вида атомов строго постоянна: различные атомы испускают рентгеновские кванты разной, но характерной для них энергии. Например, энергия этих рентгеновских квантов для алюминия около 1,5 кэВ, кремния — 1,7 кэВ, калия — 3,3 кэВ, кальция — 3,7 кэВ, железа — 6,4 кэВ. Таким образом, определив энергию квантов, можно узнать, какие атомы содержатся в изучаемом веществе, а по интенсивности излучения данной энергии — найти количество атомов в данном веществе.

Для подсчета рентгеновских квантов и одновременно измерения их энергии используются специальные детекторы — пропорциональные счетчики. Попавший в такой детектор рентгеновский квант вызывает ионизацию газа, которым наполнен счетчик, и под действием высокого напряжения, приложенного к счетчику, в нем возникает электрический импульс. Если правильно подобрать величину высокого напряжения, а также давление и сорт газа, размеры детектора, то амплитуда электрического импульса будет пропорциональна энергии рентгеновского кванта (отсюда и название этого детектора).

Совокупность электрических импульсов позволяет получить спектр излучения исследуемого вещества (рис. 2). На этом рисунке мы видим несколько «горбов» — это и есть спектральные «линии» излучения. Спектральные линии теоретически должны быть очень узкими, но из-за специфичности данных детекторов они становятся «размытыми», хотя положение максимумов линий не меняется и соответствует теоретическим значениям.

«Размытие» линий затрудняет их анализ: с помощью

пропорциональных счетчиков нельзя определить в отдельности интенсивность двух близких по энергиям линий, поскольку они сливаются в одну. Алюминий и кремний (а также магний) дают одну общую «линию» в спектре горной породы, калий вместе с кальцием образуют другую «линию». Третья «линия» на этом рисун-

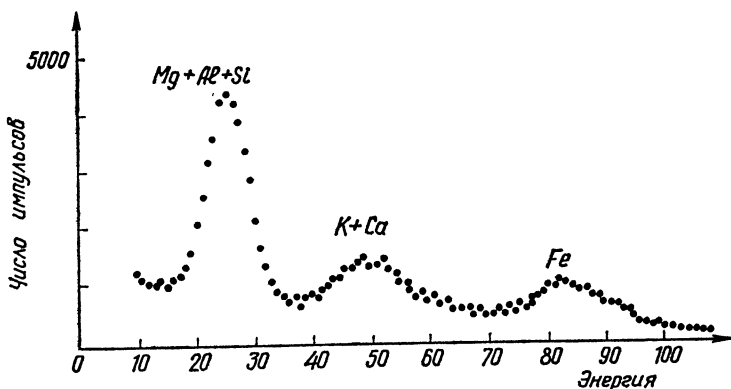


Рис. 2. Пример спектра флуоресцентного излучения, полученного при лабораторных исследованиях в вакуумной камере

ке принадлежит железу. Разница в энергиях между этими тремя «линиями» достаточно велика, так что они довольно легко различаются. Таким образом, полученный спектр дает возможность получить определенную информацию при использовании рентгено-флуоресцентного метода.

Каким же образом определяется интенсивность реальных спектральных линий отдельных элементов? Здесь на помощь приходит так называемый «метод фильтров». Дело в том, что поглощение рентгеновского излучения в каком-либо веществе зависит от энергии этого излучения весьма сложным образом: наряду с плавной зависимостью существуют и резкие перепады—скачки. Следовательно, взаимодействие рентгеновских квантов, незначительно отличающихся по энергии, с каким-либо веществом может весьма различаться для каждого из этих квантов. А это приводит к тому, что сильно отличается и вероятность прохождения этих квантов сквозь вещество. Например, если на пути рентгеновских квантов, соответствующих флуоресцентному излучению алюминия и кремния, поставить алюминие-

вую фольгу толщиной 10 мкм, то она пропустит 44% излучения алюминия и лишь 0,008% излучения кремния. Таким образом, пропуская линию алюминия в 5500 раз лучше, чем линию кремния, такая фольга будет «отфильтровывать» рентгеновское излучение. Схематически это изображено на рис. 3.

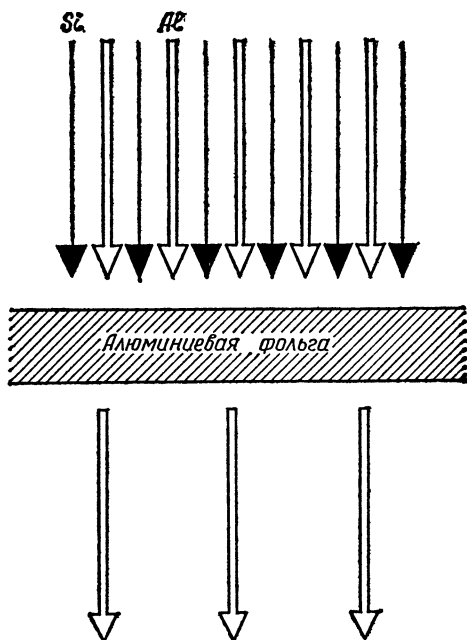


Рис. 3. Принцип действия характеристического фильтра, применяемого для разделения линий элементов, имеющих близкие по значению энергии флуоресцентного излучения

Можно подобрать фильтры для пар различных элементов: алюминий+кремний, калий+кальций и т. д. Поскольку при подобной «фильтрации» интенсивность одной из линий значительно ослаблена (причем заранее известна степень ослабления), то сравнение спектров излучения исследуемого образца, полученных с фильтрами и без фильтров, позволяет в отдельности определить интенсивности всех неразделенных линий.

Важно отметить, что на основе рентгеновского изотопного флуоресцентного метода можно создать довольно простую аппаратуру для проведения химического анализа вещества в космических условиях, удовлетворяющую всем поставленным выше требованиям. Радио-

активные источники, необходимые для облучения грунта, абсолютно надежны в работе, они не требуют настройки, наладки и не нуждаются в электрической энергии. Пропорциональные счетчики, регистрирующие рентгеновское излучение грунта, компактны и легки. Информацию легко перевести в электрические величины — амплитуды импульсов, что очень удобно для передачи по линиям космической радиосвязи. Наконец, исследуемые рентгеновские спектры довольно просты (в них всего несколько линий) по сравнению с оптическими.

К настоящему времени в исследованиях химического состава грунта, проведенных непосредственно на поверхности Луны, применялись только два из перечисленных методов. Рентгеновский флуоресцентный метод анализа, предложенный коллективом советских ученых, с успехом был применен при работе автоматических самоходных аппаратов «Луноход-1 и -2». Американские ученые на станциях «Сервейер-5, -6 и -7» использовали метод «обратно рассеянных альфа-частиц» (подробное описание которого будет дано ниже), но впоследствии уже на марсианских станциях «Викинг-1 и -2» они тоже применили рентгеновский флуоресцентный метод.

ИЗМЕРЕНИЯ С ОРБИТЫ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЛУНЫ

Исследования химического состава лунного грунта были начаты с орбиты искусственных спутников Луны. Эти спутники позволили изучить характеристики окололунного пространства, магнитного и гравитационного полей Луны, а также, что особенно важно для нас, получить общие сведения геохимического характера. Естественно, что такие исследования являются глобальными, т. е. их результаты получаются усредненными по значительным площадям лунной поверхности.

Измерения, проведенные с помощью гамма-спектрометра, установленного на первом искусственном спутнике Луны — станции «Луна-10», позволили получить данные о гамма-излучении больших областей лунной поверхности. Часть этого излучения, как полагают, возникает за счет взаимодействия космических лучей с поверхностью, а другая связана с собственной радиоактивностью лунных пород. После сравнения интенсивно-

сти гамма-излучения от распада в лунном грунте естественных радиоактивных элементов (калия-40, изотопов урана и тория) с интенсивностью излучения этих элементов, содержащихся в земных горных породах, ученые пришли к выводу, что лунные породы содержат радиоактивные элементы, концентрация которых соответствует земным породам основного состава (типа базальтов). Таким образом, полученные данные указывали на отсутствие (в районах лунной поверхности, где проводились измерения) пород с таким же содержанием радиоактивных элементов, как в земных кислых породах (гранитах). Вместе с тем нельзя было на основании лишь орбитальных исследований полностью исключить возможность существования ультраосновного или метеоритного вещества в этих районах.

Исследования Луны с орбит искусственных спутников были продолжены советскими станциями «Луна-11, -12, -14 и -15» (1966—1969 гг.) и пятью американскими аппаратами серии «Лунар орбитер» (1966—1967 гг.). Эти станции дали возможность получить детальные снимки больших площадей видимой и невидимой с Земли сторон Луны, определить аномалии ее гравитационного поля, изучить метеоритную и радиационную обстановку в окрестностях Луны. Полученные результаты позволили сделать вывод о реальности осуществления полетов пилотируемых космических кораблей. Началась также отработка возможности мягкой посадки космической станции в разных районах Луны, т. е. проведение различных маневров с изменением селеноцентрической орбиты («Луна-15»).

Исследование Луны и окололунного пространства с орбиты искусственных спутников Луны оказалось весьма перспективным, поэтому они продолжают и в настоящее время («Луна-19» в 1971 г., «Луна-22» в 1973 г., «Луна-23» в 1974 г.).

Американская программа исследования Луны с орбиты ее искусственных спутников после полетов аппаратов «Лунар орбитер» осуществлялась с помощью командных модулей кораблей «Аполлон», а также небольших спутников, запущенных экипажами «Аполлона-15 и -16». На борту «Аполлона-15 и -16» находились приборы, позволявшие с помощью метода рентгеновского флуоресцентного анализа (примененного для исследования лунного грунта впервые на «Луноходе-1» в

1970 г.) измерять содержание ряда элементов в поверхностном слое лунного грунта.

Однако следует отметить, что на «Луноходах» была реализована полная схема рентгеновского флуоресцентного анализа: там имелись как радиоактивные источники для возбуждения рентгеновского излучения грунта, так и детекторы для его регистрации. Американские же космонавты имели на борту лишь детекторы, а в качестве источника для возбуждения флуоресценции лунного грунта «использовалось» солнечное рентгеновское излучение (рис. 4), энергия которого достаточна

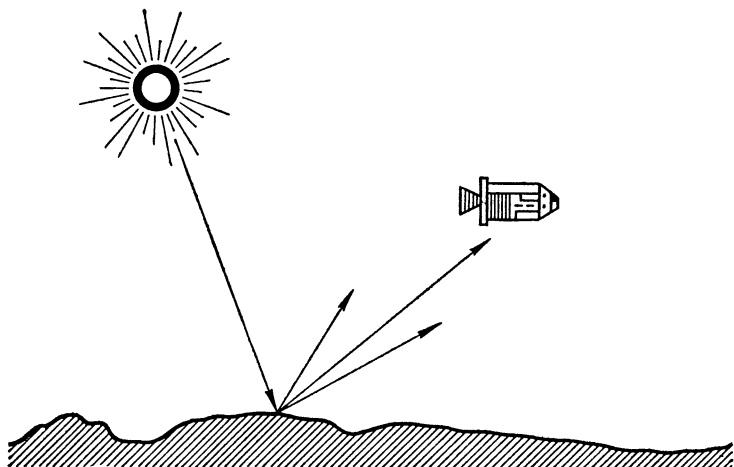


Рис. 4. Принцип измерения усредненного содержания химических элементов на больших участках лунной поверхности, использующийся при полете кораблей «Аполлон-15 и -16» (для облучения грунта «использовалось» рентгеновское излучение Солнца)

для возбуждения лишь наиболее легких элементов—магния, алюминия, кремния. Кроме того, интенсивность рентгеновского излучения Солнца весьма непостоянна, в силу чего невозможно было проводить абсолютные измерения концентраций.

В американском эксперименте использовались три детектора с окнами, изготовленными из тонкой берилловой фольги. Ввиду того что кремний, магний и алюминий имеют очень близкое по энергии флуоресцентное излучение, для определения интенсивности линий

этих элементов применялись алюминиевый и магний-
вый фильтры. С помощью специального источника пе-
риодически проводилась калибровка детекторов. Для
контроля за интенсивностью рентгеновского излучения
Солнца был установлен солнечный монитор, работав-
ший в диапазоне энергий от 1 до 3 кэВ. Для получе-
ния энергетических спектров флуоресцентного рентге-
новского излучения использовался восьмиканальный ам-
плитудный анализатор.

Измерения с орбиты проводились в течение десят-
ков часов и охватили около 20% лунной поверхности.
В тех местах, где измерения были проведены как
«Аполлоном-15», так и «Аполлоном-16», они дали близ-
кие результаты, совпадающие с точностью до 10%. В
результате этих исследований было измерено относи-
тельное содержание магния, алюминия и кремния в от-
дельных, но обширных районах Луны. Из-за большой
скорости и значительной высоты орбитального полета
каждая «точка» этих измерений соответствовала уча-
стку поверхности размером примерно 100×150 км.

Орбитальные измерения подтвердили тот факт, что
«морские» и «материковые» районы Луны заметно раз-
личаются по содержанию в них алюминия. Отношение
концентраций «алюминий/кремний» составило для «мор-
ских» районов от 0,29 до 0,38, для «материковых» —
от 0,42 до 0,69, что хорошо согласуется с результатами
других экспериментов. Наблюдалась также определен-
ная корреляция между содержанием алюминия и отра-
жающей способностью соответствующего участка лун-
ной поверхности. Этот факт был вскоре подтвержден
соответствующими исследованиями, выполненными на
«Луноходе-2».

Любопытно отметить, что содержание алюминия в
«морских» районах было выше в краевых частях «мор-
рей», граничащих с «материками». Этот результат мож-
жет, вообще говоря, подтверждать факт горизонтально-
го переноса вещества на лунной поверхности с более
высоких «материковых» районов в более низкие «мор-
ские». Однако не исключено, что это вызвано неизбеж-
ным для данного эксперимента усреднением по сравни-
тельно большой площади: при измерении краевых об-
ластей «морей» в поле зрения прибора могли попадать
части «материковых» районов. В то же время обнару-
женное «Луноходом-2» постепенное изменение хими-

ческого состава вещества в зоне контакта «морской» и «материковой» областей свидетельствует в пользу наличия перемещения вещества на лунной поверхности.

О наличии переноса вещества свидетельствуют также и материалы изучения некоторых особенностей структуры лунной поверхности. Так, например, находящиеся на довольно сглаженной поверхности камни погружены в грунт так, что имеется резкая линия раздела, причем верхние поверхности камней часто совсем не покрыты пылью. Кроме того, отсутствуют нарушения структуры грунта, которые должны были бы возникнуть при падении этих камней, являющихся выбросами при кратерообразовании. Для объяснения этих фактов требуется достаточно эффективный и быстрый механизм, который должен был сгладить грунт и при этом не покрыть слоем пыли верх камней и не образовать вала вокруг каждого камня.

Характер зон раздела между горами и окружающими районами свидетельствует в пользу переноса материала возвышенностей вниз по склонам. Камни часто концентрируются вдоль разломов и пиков, что, по-видимому, вызвано переносом мелких частиц вниз, приводящим к обнажению ранее погребенных камней. В горных районах на любой широте местные низменности являются относительно плоскими. Это также можно рассматривать как результат переноса вещества с соседних склонов вниз.

По-видимому, сейчас мы наблюдаем запечатленные на поверхности результаты перемещений мелких частиц грунта, происходивших в течение миллионов лет до «космической эры». Имеются экспериментальные данные, свидетельствующие о наличии пыли в окололунном пространстве. Так, например, еще приборами «Сервейеров» было зарегистрировано свечение лунного горизонта, продолжавшееся в течение 90 мин после захода Солнца. С помощью «Сервейера-7», в частности, было зарегистрировано свечение горизонта, распространявшееся на 2—3° в каждую сторону от линии захода Солнца и приподнятое по вертикали на 3—30 см над линией горизонта, причем интенсивность свечения монотонно уменьшалась со временем.

Было предложено следующее объяснение этому явлению. Вблизи поверхности, видимо, имелось облако взвешенных частиц лунного грунта, которые и рассеи-

вали солнечный свет в полностью затемненную область, где стоял космический аппарат. Расчет рассеяния света на пылевых частицах позволил оценить их радиус — 5—6 мкм.

Интересную информацию дали оптические эксперименты, проводившиеся на «Луноходе-2». Установленный на нем астрофотометр регистрировал яркость лунного неба в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Была зарегистрирована избыточная по сравнению с ожидаемой яркость в течение лунного дня и лунной ночи, особенно сильная в видимой области спектра. Ее изменение в зависимости от зенитного расстояния Солнца может быть объяснено наличием в окололунном пространстве неких частиц, рассеивающих свет. Причем оптические характеристики этих частиц оказались такими же, как у лунной пыли.

Необычные оптические эффекты были замечены также при наблюдениях, проведенных на окололунной орбите во время полета кораблей «Аполлон». Командир «Аполлона-17» Ю. Сернан делал зарисовки своих визуальных наблюдений, в частности отмечал появление свечения над лунным горизонтом при восходе Солнца. За 2 мин до восхода Солнца на фоне свечения появились своеобразные лучистые структуры — «стримеры», интенсивность которых быстро увеличивалась. Скорость изменения яркости «стримеров» и их угловые размеры (более 30°) указывают на то, что они производились каким-то процессом, действующим в окрестностях Луны. Образование «стримеров» может быть вызвано некоторыми действительными физическими вариациями в концентрации пыли. Характерно, что «стримеры» не наблюдались в течение полета «Аполлона-16» (за полгода до «Аполлона-17»), и, следовательно, области рассеивающих частиц не могут быть постоянными по природе (концентрация частиц в них может существенно изменяться со временем).

Визуальные наблюдения астронавтов на окололунной орбите могут быть объяснены рассеянием света пылевой средой, простирающейся за пределы орбиты корабля (120 км). Наиболее вероятные размеры частиц пыли оцениваются в 0,1 мкм. Результаты описанных наблюдений дают хорошее согласие с данными «Лунохода-2».

Каким же образом попадают частицы лунного грун-

та на такие высоты? Каковы механизмы подъема и переноса лунного вещества?

Однозначного ответа ученые пока не нашли. Наиболее вероятным считается так называемый электростатический механизм. В одном из вариантов этого механизма учитывается горизонтальный перенос лунной пыли, выбитой с поверхности ударами микрометеоритов, в слабом электрическом поле. Это поле образуется при ионизации атомов грунта под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца, и его величина достаточна для поддержания во взвешенном состоянии небольших заряженных пылинок. Удары микрометеоритов разрушают материал поверхности и выбивают частицы пыли — мельчайшие из них ускоряются в электрическом поле и ускользают в межпланетное пространство, преодолев притяжение Луны, наиболее крупные частицы материала опускаются в непосредственной окрестности падения микрометеорита, и только часть изверженного материала имеет массу, пригодную для переноса силами электрического поля. Эти частицы движутся за счет горизонтальной составляющей начальной скорости, «подпрыгивая» в электростатическом поле Луны. Время их жизни в полете над освещенной плоской равниной оценивается от 4 до 300 ч.

Другой вариант электростатического механизма «работает» только в зоне терминатора². При прохождении последнего по лунной поверхности отдельные мелкие возвышенности (бугорки, камни и т. д.) остаются частично освещенными довольно длительное время, а соседние участки находятся в тени. На границе между освещенной и совершенно темной областями при взаимодействии рентгеновского и ультрафиолетового излучений Солнца с лунной поверхностью возникают электрические поля, причем значительно более сильные, чем в рассмотренном выше варианте. Эти поля могут поднимать мельчайшие заряженные частицы лунного грунта на некоторую высоту. Дальнейшее свое движение пылинки совершают уже под действием гравитационных сил, например, перемещаясь вниз по склонам и засыпая дно кратеров. В пользу рассмотренного механизма

² Терминатор — граница дня и ночи, очень резкая на Луне из-за отсутствия атмосферы. При вращении Луны терминатор перемещается по лунной поверхности.

говорит такой факт: когда интенсивность рентгеновского излучения Солнца возрастала (а это должно приводить к увеличению количества пылинок над лунной поверхностью, которые рассеивают видимый солнечный свет), то возрастала и интенсивность свечения лунного горизонта, измеренного «Сервейерами».

До настоящего времени непосредственная проверка в лунных условиях предложенных электростатических механизмов не проводилась. В лабораторных условиях на Земле велось экспериментальное моделирование некоторых сторон этого процесса, причем на аналогах лунного грунта и на натуральных образцах лунного вещества подтверждена возможность электростатического переноса. Возникли, однако, принципиальные трудности, связанные с невозможностью обеспечения в модельных экспериментах тех же условий, что и на Луне (в частности, очень высокого вакуума, необходимого для реализации электростатических эффектов). Поэтому проведенные к настоящему времени лабораторные исследования не являются достаточно полными и не привели к определенным количественным выводам. В связи с этим представляется целесообразным обсудить ряд экспериментов, выполнение которых в лунных условиях позволило бы определенно судить об эффективности электростатического механизма переноса.

При переносе вещества резкая граница между двумя соседними поверхностями должна размываться, а частицы — перемешиваться. Изменение некоторых свойств этих поверхностей, например химического состава, радиоактивности, оптических характеристик, как раз и может быть определено количественно, в частности для двух смежных естественных разнородных поверхностей, которыми являются лунные «моря» и «материки» (изучению подлежат свойства типичного «моря», типичного «материка» и переходной зоны между ними).

Подобные исследования начались экспериментами на «Луноходе-2». При этом был успешно применен рентгеновский флуоресцентный метод анализа грунта, использование которого для этих целей кажется весьма перспективным.

Однако изучение границы естественных разнородных поверхностей весьма затруднительно из-за отсутствия

точных данных об их первоначальных свойствах и о времени начала процесса переноса. Значительно более информативными представляются исследования «размытия» границ между разнородными материалами.

Возможен такой ход исследования. На лунный грунт помещается некоторое «пятно» (или группа «пятен») «искусственного» грунта с четкими границами. Затем через определенные промежутки времени производится исследование «размытия» границы двух разнородных поверхностей на основании комплексного изучения изменений области раздела. Количество и характер распределения частиц «искусственного» грунта на окружающей поверхности служат мерой скорости переноса. При этом механические и электрические свойства этого грунта не должны сильно отличаться от «лунных». Вещество не должно изменять своих характеристик при длительном пребывании на Луне в условиях глубокого вакуума, космической радиации, резких перепадов температуры, а также отвечать требованиям, вытекающим из особенностей доставки этого вещества на Луну, упаковки и способа нанесения на поверхность.

Наряду с этими экспериментами важно продолжать систематические исследования оптических эффектов в окололунном пространстве. Причем регистрацию свечения лунного горизонта желательно проводить при различных вариантах расположения аппаратуры относительно деталей рельефа, а визуальные наблюдения орбитальных восходов Солнца необходимо контролировать приборами.

Кроме того, наблюдения яркости лунного горизонта целесообразно проводить в течение длительных промежутков времени как в ночных, так и в дневных условиях. В ночное же время можно исследовать и эффекты взаимодействия метеоритных тел с лунной поверхностью, регистрируя возникающие при этом оптические вспышки. Возможны и другие эксперименты, например с использованием системы детекторов для определения направления и величины импульса частиц лунного реголита, приведенных в движение электростатическим или иным механизмом.

Экспериментальные исследования явлений переноса вещества на лунной поверхности позволят выяснить роль Солнца в эволюции рельефа Луны, а также помогут ответить на вопрос, почему обратная сторона Луны,

сплошь покрытая кратерами и «материковыми» возвышенностями, так разительно отличается от видимой стороны Луны, значительную часть которой занимают «морские» низменности? Таким образом, проблема переноса вещества на лунной поверхности, являющаяся частью более общей проблемы — формирования лунного рельефа, — безусловно, займет соответствующее место в последующих экспериментальных исследованиях Луны.

ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АППАРАТОВ «СЕРВЕЙЕР»

Запуски американских аппаратов типа «Сервейер» имели целью не только измерение химического состава грунта — планировалось и изучение лунного рельефа, гравитационного поля Луны, а также различных физических условий на лунной поверхности. Осуществление этой программы началось в 1966 г., когда «Сервейер-1» совершил мягкую посадку в Океане Бурь и передал на Землю изображения лунной поверхности. С помощью прилунившегося в апреле 1967 г. «Сервейера-3» проводилось (помимо телевизионной съемки поверхности) определение механических свойств грунта. Запуски «Сервейера-2 и -4» окончились неудачей.

Последние три аппарата этой серии — «Сервейер-5, -6 и -7», запущенные в 1967—1968 гг., передали цветное изображение лунной поверхности, исследовали механические свойства лунного грунта, а также произвели определение в нем содержания ряда элементов методом «обратно рассеянных альфа-частиц».

Суть этого метода в следующем. Альфа-частицы, испущенные радиоактивными источниками, при столкновениях с ядрами атомов испытывают рассеяние, причем энергия рассеянных частиц зависит от сорта ядер и от угла, под которым вылетела рассеянная частица. Если облучить какое-либо вещество альфа-частицами строго определенной энергии и установить (под фиксированным углом) счетчик рассеянных частиц, то он будет регистрировать альфа-частицы лишь определенных энергий, соответствующих наличию в изучаемом веществе тех или иных химических элементов, т. е. будет получен определенный спектр альфа-частиц. В действительности же, из-за особых свойств радиоактивных ис-

точников и счетчиков спектр будет состоять не из линий, а из «обрывов», соответствующих положению этих линий (рис. 5). По положению «обрывов» и определяют, какие элементы присутствуют в исследуемом образце.

Возможность анализа спектров рассеянных альфа-частиц в качестве метода изучения химического состава была известна давно, однако метод не получил распространения в практике лабораторных и промышленных исследований в силу нескольких причин. Например, данный метод позволяет уверенно определить в отдельности содержание в сложных образцах лишь тех элементов, которые расположены в начале периодической таблицы Менделеева. Более тяжелые элементы этим методом практически могут быть определены лишь в виде групп — «от титана до цинка» (9 элементов), все

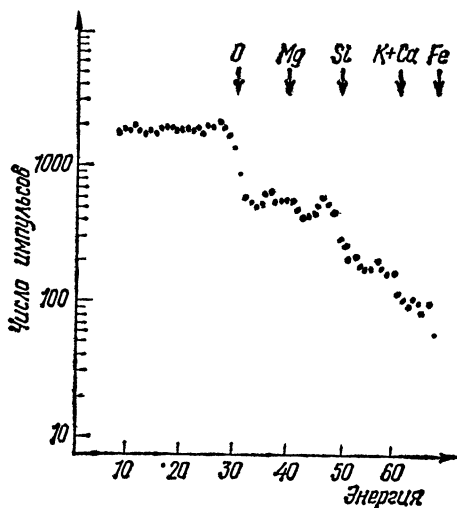


Рис. 5. Типичный спектр, получаемый при анализе, использующем метод «обратно рассеянных альфа-частиц»

элементы «тяжелее цинка» и т. д. Причем лучше всего можно определить элементы, если детектор регистрирует альфа-частицы, рассеянные на образце в обратном направлении (назад). Кроме того, метод позволяет проводить анализы только в вакууме, при этом только один анализ занимает очень много времени — десятки часов. Впрочем, в рамках программы «Сервейер» (неподвижные станции для локальных исследований Лу-

ны) последнее обстоятельство не играло особой роли. В то же время следует отметить, что данный метод дает возможность определить общую картину химического состава вещества и при этом способен указать на аномально высокое содержание каких-либо элементов (или групп элементов). Однако он не позволяет получить детальные сведения о концентрации отдельных элементов, являющихся «представительными» для разных типов горных пород. Все это определило то обстоятельство, что данный метод использовался лишь на первом этапе изучения химического состава грунта.

Разработкой рассматриваемого метода в целях его применения для космических исследований занималась группа ученых Института им. Э. Ферми при Калифорнийском университете (руководитель работ А. Туркевич). Созданная ими аппаратура станций «Сервейер» состоит из блока электроники и блока, в котором расположены радиоактивные источники и детекторы альфа-частиц. Схематическое изображение последнего блока показано на рис. 6. В блоке, установленном на «Сер-

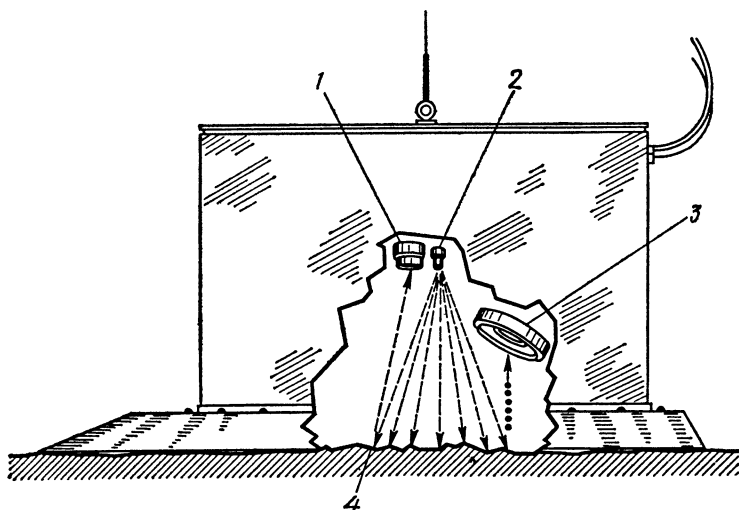


Рис. 6. Выносной блок аппарата «Сервейер» (при исследованиях блок опускался на грунт): 1 — детектор альфа-частиц; 2 — радиоактивный источник (альфа-излучатель); 3 — детектор протонов; 4 — исследуемый грунт

вейере-5», использованы 6 альфа-источников радиоактивного юрия-242 (период полураспада 163 дня, энергия альфа-частиц 6,11 МэВ) общей активностью около 100 мК. Из-за длительности предстартовых испытаний и в связи с относительно коротким периодом полураспада изотопа необходимо было вставить новый набор источников и провести его калибровку непосредственно перед самым стартом.

Сам блок представлял собой прямоугольный параллелепипед, в нижней части которого имелась круглая пластина, установленная с целью свести к минимуму погружение блока в лунный грунт. В нижней же части блока было круглое отверстие, через которое исследуемый грунт равномерно облучался альфа-частицами. Вблизи альфа-источников располагались два полупроводниковых детектора, регистрировавших альфа-частицы, рассеянные в почти обратном (облучению) направлении (в интервале углов $174 \pm 1^\circ$). Расстояния от грунта до источников и от детекторов до грунта около 7 см.

Кроме того, в блоке были установлены четыре детектора протонов. Они регистрировали протоны, возникающие при ядерных реакциях, в которых участвовали альфа-частицы и ядра элементов лунного грунта. Полученные спектры протонов давали информацию о содержании наиболее легких элементов и существенно дополняли результаты исследований, проводимых по методу «обратно рассеянных альфа-частиц».

Характерной особенностью использованного метода и созданного на его основе прибора является очень большая длительность анализа лунного грунта. При заданной конструкции геометрии прибора и использовании источников, в которых происходит $\cdot 10^{11}$ распадов радиоактивных ядер в минуту, за это время можно было зафиксировать примерно 60 альфа-частиц и всего 5 протонов. Поэтому для достаточно полного анализа требовались целые сутки непрерывной работы прибора.

Блок детекторов был соединен кабелем с электронным блоком, который находился внутри станции «Сервейер». На поверхность грунта блок детекторов опускался с помощью зубчатого механизма на нейлоновой нити. Общая масса аппаратуры 11 кг.

Впервые описанный прибор был установлен на ап-

парате «Сервейер-5», совершившем мягкую посадку в южной части Моря Спокойствия 11 сентября 1967 г. Через 2 ч после посадки прибор был включен, и началась калибровка с помощью эталонного образца. Полученный спектр совпадал с тем, который был получен на Земле еще до запуска.

После окончания калибровки блок детекторов был опущен на нейлоновой нити до высоты около 0,5 м от грунта, и в течение 3 ч проводились измерения фона космических лучей. Затем прибор полностью был опущен на грунт, и телевизионные изображения подтвердили, что прибор занял правильное положение. С этого момента собственно и начался эксперимент. Его продолжительность составляла около 17 ч.

13 сентября 1967 г. «Сервейер-5» совершил «подскок» после специального включения реактивных двигателей. При этом он немного сполз вниз по склону кратера и занял несколько другое положение на грунте. Анализ нового участка продолжался еще 66 ч.

Первая обработка полученных спектров с помощью ЭВМ позволила определить процентное содержание в лунном грунте кислорода ($58 \pm 3\%$), алюминия ($6,5 \pm 2\%$) и группы из 16 элементов «от фосфора до цинка» ($13 \pm 3\%$). Сделаны были также оценки наличия углерода (менее 3%), натрия (менее 2%), группы «железо, кобальт, никель» (более 3%) и группы «тяжелее цинка» (менее 0,5%).

Таким образом, в результате анализа поверхностного слоя лунного грунта (глубиной около 20 мкм) впервые удалось установить общность характера распространности породообразующих элементов — кислорода, кремния и алюминия — на Земле и на исследованном участке лунной поверхности площадью в несколько квадратных сантиметров. Однако насколько типичен такой состав грунта для всей поверхности Луны было неясно, поскольку исследования проводились практически в «точке». Необходимо было продолжить исследования в других районах Луны.

«Сервейер-6» (ноябрь 1967 г.), совершивший мягкую посадку в Центральном Заливе, и «Сервейер-7» (январь 1968 г.), прилунившийся на склоне крупного кратера Тихо, были оснащены той же аппаратурой, исполь-

зующей метод «обратно рассеянных альфа-частиц». Прибор, установленный на «Сервейере-6», провел анализ только одного участка поверхности: после «подскока» лунной станции выяснилось, что блок датчиков прибора для исследования химического состава грунта находился в перевернутом положении и не мог вести анализ поверхности. А работа прибора на «Сервейере-7» заставила изрядно поволноваться его создателей. Дело в том, что произошло «заедание» в механизме опускания блока датчиков на грунт. После подачи команды на опускание блок так и остался висеть в полуметре над лунной поверхностью. Сначала пытались немного встряхнуть блок (для этого стали включать электромоторы антенны и солнечной батареи), надеясь, что их вращение создаст какие-то вибрации корпуса станции «Сервейер-7». Но этого не произошло.

Через несколько дней было принято решение на рискованную операцию — стали давить на блок ковшом маленького «экскаватора» — электрической лопатки, служившей для изучения механических свойств грунта. После нескольких неудачных попыток застрявшую нейлоновую нить удалось, наконец, вытянуть и опустить на грунт. В последующие дни этим же ковшом переставили блок детекторов на два других участка поверхности. Таким образом, удалось сделать анализы трех участков грунта в пределах метровой площадки.

Полученные результаты в силу ограничений самого метода потребовали проведения дополнительных лабораторных экспериментов, моделирующих конкретные условия работы приборов на Луне. Это было связано с уточнением положения блока детекторов на поверхности, с необходимостью учета влияния изменения температуры счетчиков и т. д. Обработка спектров с учетом результатов дополнительных модельных опытов позволила американским ученым сделать окончательные выводы относительно проведенных анализов концентраций в лунном грунте кислорода, магния, алюминия, кремния, кальция, титана и железа. При этом результаты анализов в «морских» районах (Море Спокойствия и Центральный Залив) оказались близки между собой. В «материковом» же районе (кратер Тихо) измерения показали состав, отличающийся от ранее изученных районов (см. далее табл. 1 и 2).

РЕНТГЕНОВСКИЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД: «ЛУНОХОД-1»

Исследования, выполненные аппаратами «Сервейер», так же как и осуществленный позднее анализ образцов грунта, доставленных на Землю из «морских» районов Луны, показали, что хотя лунные породы и относятся к одному и тому же типу (базальтовых), однако имеются некоторые отличия в их составе. Таким образом, оказалось, что ряд проблем строения Луны и происхождения форм лунного рельефа очень трудно разрешить путем анализа химического состава лишь отдельных участков лунной поверхности. К таким проблемам селенологи относят, в частности, вопросы о степени однородности состава поверхности и о связи рельефа с химическим составом.

Для того чтобы сделать какие-либо определенные выводы на сей счет, необходимо было провести сравнительные исследования на больших площадях, изучить состав поверхностного и подповерхностного слоев лунного грунта в пределах характерных районов, где широко представлены разнообразные типы лунных образований: кратеры разных размеров и форм, гряды, разломы, камни и скальные обломки. Единственная возможность для проведения подобных исследований — использование самоходных аппаратов, осуществляющих перемещение по лунной поверхности. Изучение состава поверхности в пределах этих определенных районов кроме самостоятельного интереса способствует осуществлению разнообразной работы по «физическому» картографированию Луны.

Самоходные лунные автоматы, исследуя образцы в местах их естественного залегания, могут осуществлять химические и минералогические анализы лунных пород, определять их физико-механические свойства по маршруту следования, передавая на Землю собранную информацию. С помощью подобных аппаратов можно обследовать обширные территории и получить большой объем информации о строении лунной поверхности, осуществить передачу на Землю телевизионных изображений окружающего ландшафта.

С учетом всех этих требований советская программа космических исследований Луны предусматривала создание мобильных автоматических лабораторий, спо-

собных передвигаться по поверхности Луны и производить комплексные научные исследования Луны вдоль своего пути. При этом пришлось решить целый ряд принципиально новых задач. Ведь, например, даже после серии мягких посадок на поверхность Луны и целого ряда последующих исследований оставался невыясненным вопрос о том, каким образом осуществлять передвижение аппарата по покрытой слоем пыли лунной поверхности при наличии кратеров и камней различных размеров, в условиях космического вакуума и силы тяжести, составляющей лишь одну шестую земной.

В связи с этим необходимо сказать несколько слов о лунной пыли. В земных условиях мы привыкли, что пыль — это мелко измельченный материал, который ведет себя почти как жидкость. Пыль (песок) течет так же, как вода; ее поверхность так же, как и у жидкости, находящейся в равновесии, — плоская и ровная. Эти свойства пыли объясняются тем, что в пылинках и на ее поверхности находится воздух, который вместе с воздухом, содержащимся между пылинками, «смазывает» частицы, и они легко скользят относительно друг друга.

Лунная поверхность находится в условиях, коренным образом отличных от земных: постоянное облучение солнечным ветром (т. е. частицами, испускаемыми Солнцем) и метеоритная бомбардировка, воздействие ультрафиолетового излучения и глубокий космический вакуум. Длительное ее пребывание в вакууме привело к тому, что на ней произошло обезгаживание не только пространства между частицами, но и самих частиц. В результате пылевые частицы лунного грунта примыкают непосредственно одна к другой или к нижележащей поверхности, «склеиваясь» в единое целое или налипая на поверхность других тел при соприкосновении. Эти контактные силы (так называемые силы Ван-дер-Ваальса) обратно пропорциональны седьмой степени расстояния между частицами, и, поскольку это расстояние порядка размеров атомов, контактные силы более значительны, чем гравитационные.

Частицы лунной пыли соединяются в одно целое, другими словами, — пылевые частицы склеиваются друг с другом, образуя легкий, но твердый неоднородный материал. Слипшиеся таким путем образования

при механическом воздействии рассыпаются на мелкие части, а под действием газовых струй тормозных двигателей при посадке космических аппаратов на поверхность Луны пыль легко поднимается кверху. Все это надо было учитывать советским конструкторам.

В результате тщательных расчетов и многочисленных наземных испытаний ими было создано самоходное шасси на восьми колесах ажурной конструкции с грунтозацепами, с независимой подвеской и приводом колес. Впервые была сконструирована машина — «Луноход-1», способная передвигаться в сложнейших условиях лунной поверхности и оснащенная комплексом аппаратуры для научных исследований уже не в одной точке, а в целом районе лунной поверхности.

Выбранный район для работы «Лунохода-1» — Море Дождей — является одним из крупнейших лунных «морей» с четко выраженной кольцевой структурой, окаймленный береговыми горными массивами. Лишь на юго-западе Море Дождей не имеет горного обрамления, и его поверхность смыкается там с Океаном Бурь. Равнины лунных «морей» представляют собой обширные излияния базальтовых лав. Коренные скальные породы перекрыты с поверхности слоем мелкораздробленных пород, так называемым реголитом, имеющим незначительную толщину (менее 10 м). Поверхность Моря Дождей более или менее равномерно покрывают кратеры диаметром до нескольких километров. Плотность их распределения примерно такая же, как и в «морях» экваториальной зоны видимого с Земли полушария Луны. Иногда выделяются участки протяженностью в десятки километров, в которых плотность распределения мелких кратеров на порядок выше средней.

В районе Моря Дождей отмечена одна из наиболее крупных гравитационных аномалий Луны (так называемых масконов), вызванная, по-видимому, избыточными концентрациями масс вблизи лунной поверхности (избыток массы в Море Дождей оценивается примерно в $5 \cdot 10^{14}$ т). Факт обнаружения таких аномалий в местах очень древних лунных образований свидетельствует о Луне как о более твердом теле и с более низкими температурами по сравнению с Землей.

Запуск станции «Луна-17» с «Луноходом-1» на борту состоялся 10 ноября 1970 г. С орбиты искусственного спутника Земли станция стартовала к Луне, и пос-

ле успешного проведения необходимых маневров она мягко опустилась 17 ноября в западной прибрежной части Моря Дождей в 40 км к югу от мыса Гераклид в точке с селеноцентрическими координатами $38^{\circ}17'$ с. ш. и $35^{\circ}00'$ з. д.

Основным назначением автоматической станции «Луна-17» являлась доставка на лунную поверхность автоматического самоходного аппарата — «Лунохода» и обеспечение тем самым работы первой в мире подвижной автоматической лаборатории на Луне. С помощью «Лунохода-1» предполагалось решить обширный комплекс инженерно-технических задач, провести разносторонние научные исследования.

К ним относились: изучение топографических и геоморфологических особенностей местности; определение химического состава и физико-механических свойств лунного грунта; исследование радиационной обстановки на трассе полета к Луне, в окололунном пространстве и на поверхности Луны; исследование рентгеновского космического излучения; эксперименты по лазерной локации Луны с помощью углового светоотражателя, установленного на «Луноходе-1».

Запуском станции «Луна-17» предусматривалось также решить ряд конструкторских и инженерно-технических задач, продолжить отработку посадочной ступени и способа мягкой посадки на поверхность Луны. Кроме того, предполагалось провести отработку методов дистанционного управления с использованием передаваемого на Землю телевизионного изображения лунной поверхности, приобрести экипажем опыт по управлению движением «Лунохода», проверить его систему терморегулирования при работе в периоды лунных дней и ночей, получить телевизионную информацию с лунной поверхности по маршруту передвижения. Следует отметить, что успешная доставка на Луну автоматического аппарата «Луноход-1» позволила перейти от исследования лунной поверхности в отдельных точках, проводимых спускаемыми автоматами, к обследованию значительных по протяженности ее районов.

Автоматическая передвижная лаборатория — «Луноход-1» и складывающиеся трапы для его схода на поверхность Луны были установлены на унифицированной посадочной ступени станции «Луна-17». Сам самоходный аппарат состоял из двух основных частей: при-

борного отсека и колесного шасси. Масса «Лунохода-1» — 756 кг.

Герметический приборный отсек, изготовленный из легких и прочных сплавов, имел форму усеченного конуса, верхняя часть которого использовалась как радиатор-охладитель в системе терморегулирования «Лунохода-1» и закрывалась специальной крышкой. Эта крышка выполняла двойную функцию: в период лунной ночи она закрывала радиатор и препятствовала излучению тепла из отсека, а в течение лунного дня крышка была открыта, и элементы солнечной батареи, расположенные на ее внутренней стороне, обеспечивали подзарядку аккумуляторов, являющихся источником питания бортовой аппаратуры.

В приборном отсеке «Лунохода-1» размещались передающие и приемные устройства радиокомплекса, приборы системы дистанционного управления, системы электропитания, блоки коммутации и автоматики, приборы системы обеспечения теплового режима, электронно-преобразовательные устройства научной аппаратуры.

Бортовой радиокомплекс обеспечивал прием команд из центра управления «Луноходом» и передачу информации с борта самоходного аппарата на Землю. Телевизионная система, две камеры которой располагались в передней части корпуса, была предназначена для передачи на Землю телевизионных изображений местности, необходимых «экипажу», управляющему с Земли движением «Лунохода». Кроме того, специальные камеры обеспечивали съемку панорамы окружающей местности во время стоянки «Лунохода».

Резкие температурные перепады при смене дня и ночи на поверхности Луны, а также большая разница температур между частями «Лунохода-1», находящимися на солнце и в тени, обусловили необходимость разработки для него специальной системы терморегулирования. Поддержание необходимого для нормальной работы аппаратуры теплового режима «Лунохода-1» обеспечивалось как пассивными, так и активными методами. К пассивным относилось уменьшение теплообмена между отдельными элементами конструкции «Лунохода» и окружающим пространством посредством применения экранно-вакуумной теплоизоляции и специальных

внешних покрытий. Тепловой режим оборудования, расположенного внутри приборного отсека, обеспечивался активными методами, т. е. путем принудительной специальной циркуляции газа внутри самоходного аппарата. При этом для подогрева газа служил изотопный источник тепловой энергии, расположенный в задней части корпуса.

Приборный отсек «Лунохода-1» был установлен на восьмиколесном шасси, создание которого разрешило принципиально важную задачу космонавтики — возможность передвижения автоматической лаборатории по поверхности Луны. Самоходное шасси было сконструировано так, чтобы гарантировать высокую проходимость «Лунохода» по лунной поверхности и надежную работу в течение длительного времени при минимальном собственном весе и потребляемой электроэнергии. Шасси обеспечивало передвижение «Лунохода-1» вперед и назад, а также его повороты (на месте и в движении).

Для измерения содержания в лунном грунте основных породообразующих элементов на «Луноходе-1» была установлена спектрометрическая аппаратура РИФМА (Рентгеновский Изотопный Флуоресцентный Метод Анализа). Спектрометр РИФМА (так же как и его модернизированный вариант — РИФМА-М, установленный на «Луноходе-2») был разработан и создан в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе (руководитель работ Г. Е. Кочаров).

Для облучения лунного грунта использовались панели с радиоактивными источниками, флуоресцентное излучение грунта регистрировалось пропорциональными счетчиками (рис. 7). Счетчик, металлический цилиндр диаметром около 16 мм и длиной около 80 мм, был наполнен смесью аргона и метана. «Окна» для вхождения излучения изготавливались из тонких (порядка десятка микрон) материалов (алюминий, синтетические пленки). Электрический импульс, возникавший в счетчике при прохождении через него флуоресцентного рентгеновского излучения грунта, усиливался в электронном преобразователе и по радиоканалу передавался на Землю. Для преобразования электрического сигнала на борту «Лунохода-1» находился 64-канальный анализатор — блок амплитудно-цифрового преобразо-

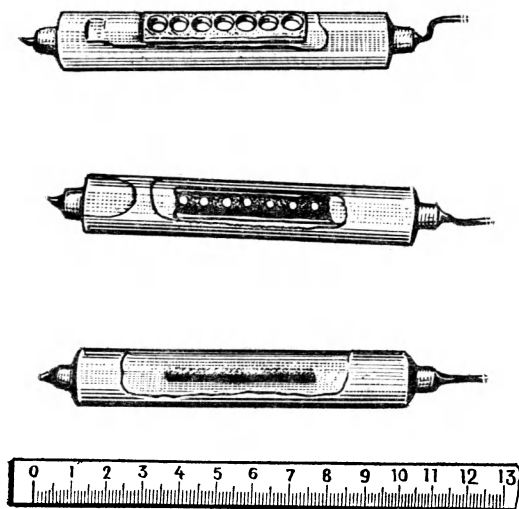


Рис. 7. Внешний вид пропорциональных счетчиков мягкого рентгеновского излучения, применявшихся в экспериментах на «Луноходе-1 и -2»

вания (передача сигналов велась в двоичном коде с добавлением нескольких служебных импульсов).

Выносной блок аппаратуры, в котором размещались радиоактивные источники, детекторы и усилитель (рис. 8), располагался вне «Лунохода» между его передними колесами (см. изображение на обложке).

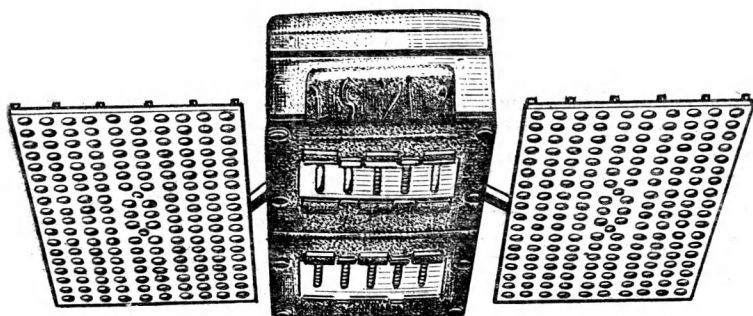


Рис. 8. Внешний вид выносного блока аппаратуры РИФМА-М. В центре — блок детекторов, в передней верхней части которого расположен счетчик для регистрации рентгеновского излучения космического происхождения. По обе стороны от блока детекторов находятся панели с радиоактивными источниками

Остальные электронные устройства находились внутри «Лунохода» (рис. 9).

После посадки на Луну, проверки функционирования бортовых систем и осмотра лунной поверхности са-

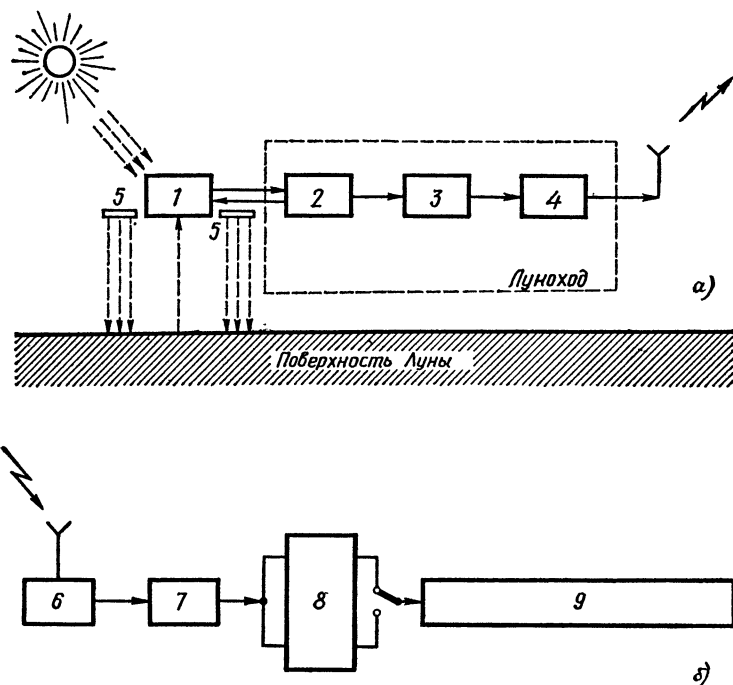


Рис. 9. Блок-схема а) бортового и б) наземного комплексов рентгеновской спектрометрической аппаратуры «Луноходов» (детектор для регистрации рентгеновского излучения космического происхождения был установлен только на «Луноходе-2»): 1 — выносной блок; 2 — электронный блок; 3 — амплитудно-цифровой преобразователь; 4 — передающее устройство; 5 — панели с радиоактивными источниками; 6 — приемное устройство; 7 — электронные устройства системы записи информации; 8 — запись информации на магнитную ленту; 9 — система обработки данных с выводом информации на ленту цифropечатающего устройства

моходный аппарат «Луноход-1» по специальному трапу сошел с посадочной ступени на поверхность Луны. Изучив район посадки и осмотрев посадочную ступень, ученые приняли решение о движении «Лунохода-1» в южном направлении. Основная задача первого лунного

дня заключалась в проверке в действии всех систем «Лунохода-1», прежде всего агрегатов самоходного шасси, системы управления и телевизионного наблюдения. Проведенный комплекс испытаний показал хорошую маневренность и управляемость «Лунохода», а также высокую надежность всех его узлов.

Не менее серьезным испытанием для конструкторов и ученых явилась первая «ночевка» «Лунохода-1». В течение долгой лунной ночи, продолжающейся около 14 земных суток, температура поверхности быстро опускается до температур около -150°C . Сеансы связи с «Луноходом-1», проводимые в течение ночи, дали возможность получить данные о состоянии его систем и показали, что температура и давление газа в приборном отсеке находятся в пределах нормы. При этом температура внешних частей конструкции «Лунохода-1» (колеса, антенны) опускалась до -90 — -125°C .

Телеметрические данные, полученные в ходе первых сеансов после окончания лунной ночи, свидетельствовали о нормальной работе бортовых систем «Лунохода-1», и его движение на юг после этого продолжилось. В течение лунного дня, с 10 по 20 декабря 1970 г., «Луноход» преодолел множество кратеров разного диаметра и глубины, каменных россыпей и к концу этого дня «зачекал» на расстоянии (по прямой) 1,5 км от места посадки.

На следующее «утро», 9 января 1971 г., «Луноход» направился в противоположную сторону — (на северо-запад) и другим путем вернулся к месту посадки. Так был успешно завершен важный этап первого в мире навигационного эксперимента по вождению самоходного аппарата по поверхности другого небесного тела. Преодолев на своем пути многочисленные препятствия, «Луноход-1» оказался в расчетной точке на Луне.

В последующие лунные дни «Луноход-1» проводил исследования в районе, расположенном севернее точки посадки.

Во время своего движения по поверхности «Луноход-1» проходил вблизи кратеров разных диаметров, преодолевал зоны кратерных выбросов вещества со значительных глубин, каменные россыпи. На некоторых из этих участков поверхности производилось включение спектрометра РИФМА, время работы которого для из-

мерения химического состава грунта (в данном месте) составляло около часа.

Наряду с этим проводилось комплексное изучение ряда участков лунной поверхности: на одном и том же участке с помощью пенетрометра³ и шасси определялись физико-механические свойства грунта, а с помощью аппаратуры РИФМА — его химический состав. Осуществлялись также эксперименты научно-технического и методического характера.

Результаты исследования показали, что состав реголита в исследуемом районе Моря Дождей близок к составу реголита в других, уже ранее обследованных районах «морского» типа. Особенное сходство в составах наблюдалось с реголитом Океана Бурь и Моря Изобилия (см. табл. 1).

Таблица 1

Состав вещества лунной поверхности в «морских» районах
(в процентах)

Элемент	Море Спокойствия («Сервейер-5»)	Океан Бурь («Аполлон-12»)	Море Изобилия («Луна-16»)	Море Дождей («Луноход-1»)
Алюминий	8	7	8	7
Кремний	21	20	20	20
Калий	—	0,3	0,08	<1
Кальций	10	7	9	8
Железо	9	13	13	12

Сравнение результатов анализов химического состава реголита Моря Дождей в разных точках показало, что вариации состава находятся в пределах точности анализа. Это означает, что в исследованном районе на глубинах от 2—3 до 30—40 м существенных изменений в химическом составе, по-видимому, нет. Отсутствие заметных вариаций химического состава грунта, вероятно, является отражением общего однородного и относительно спокойного характера рельефа исследуемого участка, который представляет собой типичный при-

³ Пенетрометр — прибор для определения прочностных характеристик грунта. Специальный штамп, расположенный на штанге, вдвигался в грунт и поворачивался. Механические свойства грунта определялись по возникшему сопротивлению перемещения штампа.

мер участков «морей», свободных от наложенных на «морскую» поверхность крупных образований.

Таким образом, результаты маршрутного исследования химического состава лунной поверхности в районе работы «Лунохода-1» показали, что реголит там представляет собой переработанный материал базальтового состава. Эти данные подтвердили, что Море Дождей, так же как и другие лунные «моря», заполнены излияниями базальтовой лавы.

В ходе проведения экспериментов наряду с физическими результатами (определение типа пород, химического состава вещества поверхности вдоль маршрута) были получены обширные материалы прикладного и технического характера, относящиеся к разным сторонам функционирования спектрометра РИФМА в составе бортовой аппаратуры. В экспериментах на «Луноходе-1» рентгеновский спектروхимический анализ был впервые применен для изучения состава другого небесного тела непосредственно на его поверхности. Результаты работы спектрометра РИФМА впервые доказали возможность проведения длительных спектрометрических измерений в столь необычных условиях.

Работа «Лунохода-1» на лунной поверхности продолжалась 318 суток. За это время им был пройден путь в 10,5 км, что позволило исследовать площадь порядка 80 000 м², оценить геологические характеристики местности, изучить физико-механические свойства грунта и его химический состав. Материалы исследований показали, что даже на относительно небольшом участке лунной поверхности с более или менее однородным химическим составом ее свойства значительно изменяются. Эти вариации проявляются в формах, незаметных при наблюдениях с искусственных спутников Луны, а также с неподвижных посадочных станций. Таким образом, успешная работа «Лунохода-1» убедительно продемонстрировала достоинства применения самоходных аппаратов при исследованиях Луны и правильность принятых при этом конструктивных решений.

РЕНТГЕНОВСКИЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД: «ЛУНОХОД-2»

Исследования Луны с помощью самоходных автоматических аппаратов, начатые «Луноходом-1», были

продолжены во время работы «Лунохода-2». Главной задачей научной программы «Лунохода-2» являлось комплексное исследование лунной поверхности в переходной зоне «море—материк», своеобразной границе между «морем» и «материком». С помощью «Лунохода-2» предстояло изучить изменение свойств поверхности и выявить вариации различных характеристик рельефа и грунта в этой области.

Для решения поставленной задачи «Луноход» был оснащен оборудованием, включающим улучшенную систему телевизионных и фототелевизионных камер (с устройством для количественных исследований оптических характеристик поверхности), магнитометр, приспособление для определения физико-механических свойств грунта и рентгеновский спектрометр РИФМА-М. В совокупности эти приборы действительно позволили выявить многие особенности строения верхнего покрова Луны в граничной зоне между «морем» и «материком».

Технические возможности «Лунохода-2» позволили установить на его борту наряду с перечисленными приборами также и другую аппаратуру: астрофотометр для измерения светимости лунного неба, радиометр, фотоприемник «Рубин-1» (для проведения экспериментов по лазерной пеленгации), а также лазерный уголкового отражатель.

8 января 1973 г. станция «Луна-21» с «Луноходом-2» на борту стартовала с Земли, а 16 января совершила мягкую посадку в южной части кратера Лемонье, находящегося на восточной окраине Моря Ясности, в точке с селеноцентрическими координатами $25^{\circ}51'$ с. ш. и $30^{\circ}27'$ в. д.

Море Ясности (второе по величине после Моря Жидких) относится к поясу круговых лунных «морей». Его чаша является одним из весьма древних образований лунного рельефа. Затопление ее базальтовыми лавами, видимо, произошло на сравнительно позднем этапе истории Луны. Таким образом, Море Ясности можно считать одним из сравнительно молодых «морей» на лунной поверхности. В процессе образования этого «моря» на его окраине был частично разрушен вал и затоплено базальтовыми лавами днище одного из ранее существовавших на материке кратеров размером 55 км в поперечнике.

В непосредственной близости от места посадки была расположена приподнятая холмистая область, к востоку и югу переходящая в «материковую» местность и далее в горные массивы Тавр. Большой интерес представлял и крупный тектонический разлом поверхности длиной около 16 км, который также находился в зоне досягаемости «Лунохода-2» (рис. 10).

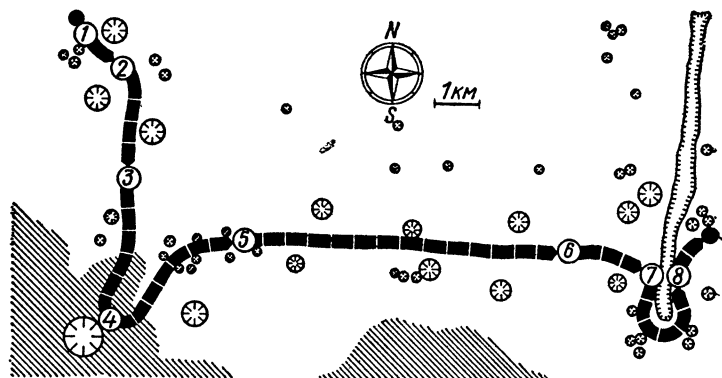


Рис. 10. Маршрут движения «Лунохода-2» в кратере Лемонье. Юго-западная часть маршрута пролегла в холмистой части предгорий, остальная часть — по днищу кратера. В частности, восточная часть маршрута проходила вблизи тектонического разлома (Борозда Прямая). Цифрами обозначены точки, где проводился анализ химического состава

После проверки функционирования бортовых систем, осмотра места посадки и калибровки спектрометра РИФМА-М начался спуск «Лунохода-2» с посадочной платформы «Луны-21». Детально обследовав с помощью «Лунохода-2» посадочную ступень и условия посадки, ученые приступили к выполнению обширной программы научных экспериментов на лунной поверхности. За время работы «Лунохода-2» на лунной поверхности с января по май 1973 г. им был пройден путь более 37 км, включавший участки с весьма сложным рельефом, сыпучим грунтом и каменными россыпями.

Богатый практический опыт, накопленный в ходе работы «Лунохода-1», позволил внести в систему «Лунохода-2» ряд усовершенствований, которые значительно расширили его возможности по маневренности, скорости и дальности перемещения. Это обстоятельство

позволило поставить перед «Луноходом-2» гораздо более разнообразные и сложные задачи. В частности, при исследовании переходной зоны предусматривалось проследить, насколько резко меняются геолого-морфологические характеристики поверхности и химический состав грунта при переходе от «моря» к «материку», как и насколько резко меняется тип пород, слагающих поверхность в этом районе.

Хотя для проведения химических исследований на «Луноходе-2» был использован тот же принцип, что и на «Луноходе-1», в устройство спектрометра, однако, был внесен ряд существенных изменений, вызванных как постановкой новых физических задач, так и улучшением технических характеристик самого прибора. В связи с тем, что «Луноходу-2» предстояло исследовать переходную зону «море—материк» и выяснить характер изменения химического состава грунта в этой зоне, требовалось найти аналитический признак, достаточно четко характеризующий два существенно различных типа поверхности — «морской» и «материковой». Рассмотрение имевшихся данных по химическому составу вещества лунной поверхности показало, что наиболее четким признаком с этой точки зрения является содержание железа, составляющее в «морях» 10—15%, а в «материковых» районах — всего 3—5%.

На основании этого большое внимание при разработке прибора РИФМА-М было обращено повышению его чувствительности и точности измерения содержания именно этого элемента. Были изменены конструкция и компоновка выносного блока, тип используемых радиоактивных источников и их расположение по отношению к блоку детекторов, улучшена конструкция детекторов, а также установлен специальный детектор для регистрации рентгеновского излучения Солнца.

Дело в том, что поверхность Луны, лишенная атмосферы, представляет собой идеальную платформу для рентгеновских исследований, которые невозможно проводить, находясь на поверхности Земли: все рентгеновское излучение, идущее к нам из космоса, полностью поглощается земной атмосферой. Поэтому на основе спектрометра РИФМА-М был задуман дополнительный астрофизический эксперимент по регистрации рентгеновского излучения космического происхождения. Детектор был расположен в верхней части выносного бло-

ка, возможность постоянного контроля его работоспособности обеспечивалась наличием в нем калибровочного источника. По положению линии этого источника в спектре детектора, ее ширине и амплитуде можно было судить о стабильности его параметров (усиления, эффективности, разрешающей способности).

Остальные детекторы, предназначенные для регистрации флуоресцентного излучения лунного грунта, располагались, как и в аппаратуре РИФМА («Луноход-1»), в нижней части выносного блока. Ряд детекторов был снабжен характеристическими фильтрами для разделения спектральных линий, близких по энергии флуоресцентного излучения элементов. Была предусмотрена возможность калибровки всех детекторов как на трассе перелета Земля—Луна, так и после посадки на лунную поверхность.

Для проверки работоспособности всего прибора один из детекторов выполнял контрольную функцию. Он не имел входных окон для попадания в него излучения, в то время как внутри него был помещен радиоактивный источник и образец земного грунта известного химического состава, постоянно облучавшийся этим источником. Таким образом, спектр, даваемый этим детектором, был заранее известен и постоянно контролировался. В результате можно было делать выводы о работоспособности всей системы детекторов в целом, а также об исправности радиотракта (при работе блока детекторы включались в работу поочередно).

Установке выносного блока на «Луноходе-2» предшествовали обширные лабораторные исследования. С помощью летного экземпляра выносного блока были изучены спектры флуоресцентного излучения большого числа земных минералов известного химического состава. Измерения проводились в большой вакуумной камере (рис. 11) в условиях реальной геометрии космического эксперимента. Исследовалась зависимость полученных результатов от степени измельчения грунта, плотности его насыпания, расстояния блока над поверхностью грунта и т. д. В результате было получено большое число спектров грунтов известного состава (см. рис. 2), знание которых было необходимо при обработке результатов, полученных во время работы «Лунохода-2», с целью определения абсолютных концентраций элементов в лунном грунте.

Измерения химического состава грунта были начаты на небольшом удалении от посадочной платформы, на валу кратера диаметром 40 м. Состав грунта здесь оказался следующим: кремний — $24 \pm 4\%$, кальций — $8 \pm 1\%$, железо — $6,0 \pm 0,6\%$, алюминий — $9 \pm 1\%$ (напомним, что измерения «Лунохода-1» в Море Дождей дали 10—12% железа). При движении «Лунохода-2» на юг исследованию подвергся кратер диаметром 13 м, удаленный от места посадки примерно на 1,5 км. Грунт в этом районе оказался схожим по составу с грунтом ранее исследуемого участка. Таким образом, судя по химическому составу, лунные породы в районе посадки станции не могут быть отнесены к типично «морским».

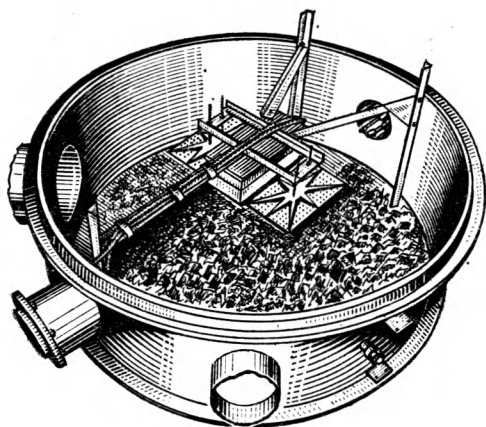


Рис. 11. Выносной блок аппаратуры РИФМА-М в большой вакуумной камере при проведении модельных экспериментов — получении спектров флуоресцентного излучения грунта известного химического состава. Блок закреплялся на штанге, и его положение относительно грунта могло изменяться

По мере продвижения «Лунохода-2» к холмам, расположенным в южном направлении, содержание железа стало падать и составило $4,9 \pm 0,4\%$ при удалении от места посадки на 4,5 км. В сеансе, проведенном в точке наибольшего продвижения в сторону «материка», зарегистрировано самое низкое содержание железа — $4,0 \pm 0,4\%$, причем одновременно содержание алюминия

возросло до $11,6 \pm 1,0\%$ (это определение химического состава проводилось вблизи кратера диаметром 2 км). К этому времени «Луноход-2» прошел уже несколько километров (около 10) и находился в пределах холмистой приподнятой равнины, расположенной к юго-западу от кратера Лемонье (собственно, уже вне кратера). По типу рельефа эта местность является переходной от Моря Ясности к массиву гор Тавр. Следует отметить, что по сравнению с измеренным в районе посадки отношение концентраций кремния к железу на участке наибольшего продвижения в глубь «материковой» зоны возросло в 1,5 раза, а отношение алюминия к железу — приблизительно в 2 раза. Такой состав напоминает земные горные породы анортозитового типа, по-видимому, широко распространенные на лунных материках.

При дальнейшем движении «Луноход-2» покинул зону холмов и возвратился на поверхность кратера Лемонье. Проведенные здесь измерения дали состав грунта, сходный с составом поверхности в месте посадки. Примеры спектров, полученных при работе аппаратуры РИФМА-М на «Луноходе-2», представлены на рис. 12.

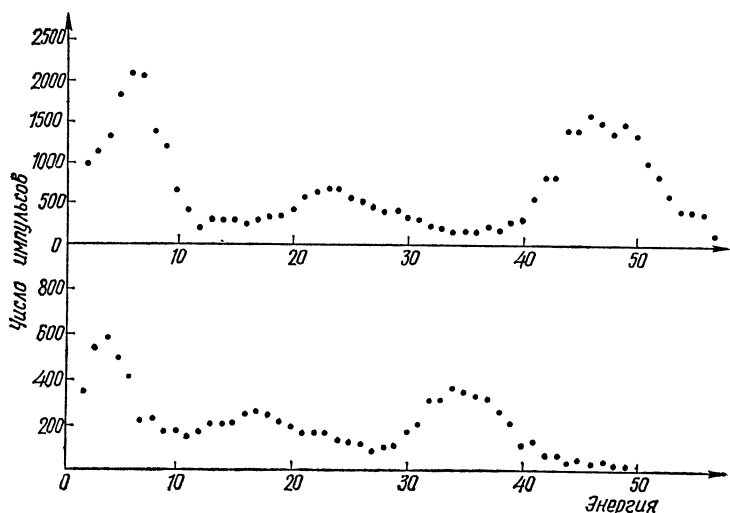


Рис. 12. Пример спектров флуоресцентного излучения лунного грунта, полученных с помощью «Лунохода-2»

При дальнейшем движении «Луноход-2» исследовал Борозду Прямую — тектонический разлом поверхности, находящийся к юго-востоку от места посадки. Результаты анализов, произведенных на западном и восточном склонах этого образования, в пределах точности эксперимента совпадают. Содержание кальция составляет около 8%, содержание железа на западном склоне — $7,5 \pm 0,9$, на восточном — $8,0 \pm 1,0\%$. Это несколько превышает концентрацию железа в равнинной части исследованного района и, по-видимому, связано с морфологическими особенностями данного участка поверхности.

По составу поверхности в исследованной «Луноход-2» части кратера Лемонье могут быть выделены три района.

Результаты анализов, выполненных в равнинной части днища кратера Лемонье, дают основание считать, что породы в районе посадки и во всей южной зоне этого кратера, по-видимому, не являются типично «морскими». Измеренное содержание железа там оказалось равным 6%, что существенно ниже типичных для «морских» районов значений (10—12%). Между тем по рельефу и морфологическим характеристикам этот район весьма похож на «морской» (см. табл. 2).

Таблица 2

**Состав вещества лунной поверхности
в «материковых» районах и в переходной зоне (в процентах)**

Элемент	Кратер Тихо («Сервейер-7»)	Кратер Аполлоний С («Луна-20»)	Переходная зона (Кратер Лемонье)	
			морская часть маршрута	материковая часть маршрута
Алюминий	11	11,4	8,8	11,6
Кремний	21	21,4	24	22
Калий	—	0,08	<1	<1
Кальций	13	10,6	8,0	9,1
Железо	4	5,5	6,1	4,0

Район в юго-западной части маршрута значительно отличается от первого. По светлому тону поверхности, обилию холмистых гряд, малому количеству камней его можно считать разновидностью «материковой» по-

верхности. Исследования химического состава поверхности в северной части этого лунного образования показали, что по крайней мере самый верхний слой реголита здесь состоит из породы с весьма малым (около 4%) содержанием железа и повышенной (по сравнению с «морскими» базальтами) концентрацией алюминия.

Район тектонического разлома (Борозда Прямая), общая протяженность которого составляет 16 км, а ширина (местами) — до нескольких сотен метров, характерен тем, что его склоны покрыты каменными россыпями, включающими в себя крупные (метровые) камни. Несмотря на сложность передвижения в зоне крупных камней, «Луноход-2» все же продвинулся к краю разлома и произвел анализ состава поверхности. Среди результатов в первую очередь следует отметить явное повышение содержания железа на склонах разлома.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены данные, свидетельствующие об обнаружении постепенных изменений химического состава грунта в переходной зоне «море—материк»: при движении «Лунохода-2» по поверхности кратера Лемонье к «материку», при нахождении самоходного аппарата в «материковом» районе и при дальнейшем движении по дну кратера в восточном направлении. Поверхность в переходной зоне явно обладает промежуточными свойствами. Отсутствие резкой границы между «морским» и «материковым» веществом говорит о взаимном влиянии этих разнородных поверхностей.

Для объяснения обнаруженного «Луноходом-2» явления можно представить себе следующую картину. Частицы «материкового» вещества, передвигаясь по склонам вниз, постепенно образовывали полосу «материкового» грунта на «морской» равнине (возможные механизмы перемещения вещества были описаны выше). Перемешивание с частицами «морского» вещества создавало в этой полосе особый грунт, по составу промежуточный между «материковыми» (анортозиты) и «морскими» (базальты) породами.

Такова общая схема. Детали этого явления, механизмы движения частиц грунта, эффект перемешивания вещества — все это требует дальнейшего изучения.

Работа «Лунохода-2» являлась первым исследованием, проведенным в переходной зоне «материк—море» и позволившим определить характеристики этой обла-

сти. Посредством прибора РИФМА-М удалось обнаружить вариации химического состава вещества лунной поверхности в этом районе, коррелирующие с геолого-морфологическими особенностями рельефа. Промежуточные свойства граничной зоны могут быть объяснены действием механизма горизонтального переноса вещества на лунной поверхности, причем ширина полосы смешивания составляет, по-видимому, несколько километров.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОСТАВЛЕННЫХ НА ЗЕМЛЮ ОБРАЗЦОВ

Осуществление задачи автоматических и пилотируемых полетов к Луне с возвращением на Землю потребовало решения целого ряда принципиально новых задач, таких, как, например, посадка на Землю аппарата, входящего в ее атмосферу со второй космической скоростью (около 11 км/с). Результатом разработок этих космических аппаратов явилось создание в Советском Союзе станций «Зонд-5 и -6». Успешно возвратившись на Землю, они доставили не только большой объем научной информации, но и необходимые данные для дальнейшей отработки полетов к Луне более сложных возвращаемых аппаратов.

Важную роль в изучении Луны сыграли пилотируемые полеты к Луне по американской программе «Аполлон», которым предшествовал целый ряд пилотируемых запусков на орбиты искусственных спутников Земли и Луны для отработки всех необходимых для выполнения этой задачи маневров.

16 июля 1969 г. состоялся запуск «Аполлона-11», предназначенного для первой высадки человека на Луну. 20 июля 1969 г. лунный отсек с астронавтами Н. Армстронгом и Э. Олдрином опустился на лунную поверхность в Море Спокойствия. Посадка корабля показала справедливость выводов, сделанных на основе предыдущих полетов автоматических станций, — грунт оказался достаточно твердым как для посадки на него пилотируемого аппарата, так и для передвижения по нему человека.

Помимо сбора образцов лунных пород для доставки их на Землю, астронавты установили на поверхности Луны пассивный сейсмометр, прибор для опреде-

ления состава солнечного ветра и лазерный отражатель.

Впоследствии было проведено еще пять пилотируемых полетов кораблей «Аполлон» на Луну. Три из них опускались на «морскую» поверхность, а два последних прилунились в «материковую» область. В результате успешных полетов по программе «Аполлон» были доставлены на Землю многочисленные образцы лунного грунта и произведен большой объем научных исследований Луны.

Помимо пилотируемых полетов на Луну, огромное значение представляли собой полеты к нашему естественному спутнику таких автоматических станций, как «Луна-16, -20 и -24», также доставивших на Землю образцы лунного грунта. Эти станции состояли из двух блоков — посадочной ступени с грунтозаборным устройством и ракеты «Луна—Земля» с возвращаемым аппаратом.

Следует отметить, что грунтозаборное устройство, впервые примененное на станции «Луна-16», явилось принципиально новым агрегатом космического аппарата. В его задачи входили и бурение лунного грунта различной плотности в условиях вакуума, и транспортировка образцов в контейнер возвращаемого аппарата, и последующая герметизация этого контейнера.

Станция «Луна-16» прилунилась 20 сентября 1970 г. в районе Моря Изобилия. По команде с Земли грунтозаборное устройство взяло образцы грунта с глубины до 350 мм и загерметизировало их в контейнере возвращаемого аппарата. Одновременно с забором грунта определялась плотность исследуемой породы.

На следующие сутки был осуществлен старт с лунной поверхности, 24 сентября возвращаемый аппарат приземлился на территории Советского Союза, и контейнер с образцами лунного грунта был передан для исследования в Академию наук СССР. Впервые в истории космонавтики с помощью автоматического аппарата удалось не только достичь поверхности Луны и произвести на ней необходимые работы, но, стартовав отсюда, успешно возвратиться на Землю.

14 февраля 1972 г. станция «Луна-20», аналогичная по конструкции станции «Луна-16», также осуществила мягкую посадку на Луну — в гористой области в 120 км к северу от места посадки «Луны-16», а затем

впервые доставила на Землю грунт из «материковой» области. Образец реголита, автоматически доставленный станцией «Луна-20» и взятый впервые из труднодоступного гористого района Луны, позволил экспериментально вскрыть существенное различие составов лунных «морей» и «материков». «Материковое» вещество оказалось рыхлым разнозернистым материалом светло-серого цвета с высоким содержанием фрагментов, относящихся к породам анортозитового типа.

Анализ вещества, доставленного «Луной-20», позволил отвергнуть идею, что состав лунных «материков» тождествен составу первичного, недифференцированного вещества, каким оно было непосредственно после образования Луны из протопланетного облака. Более того, присутствие анортозитов на поверхности лунных «материков», по-видимому, свидетельствует о значительной дифференциации первичной Луны уже на очень ранней стадии ее существования.

Доставка на Землю образцов лунного грунта дала возможность детально изучить как их химический состав, так и другие характеристики — структуру, степень дисперсности, физико-механические свойства и т. д. Оказалось возможным исследовать в лабораторных условиях химический состав различных образований поверхностного слоя лунного грунта, в том числе отдельных камней и фрагментов микронного размера; изучать кристаллы различных минералов, слагающих лунные породы. Отдельно удалось проанализировать и обнаруженные в лунном грунте стеклообразные шарики, по-видимому, образовавшиеся при частичном расплавлении грунта в момент удара микрометеоритов.

Разумеется, такие тонкие и скрупулезные исследования с помощью новейших электронных микроскопов и других приборов, составляющих арсенал современной науки, можно проводить лишь на Земле в специальных лабораториях. Только в этих условиях возможно делать анализы с большой точностью и определять в исследуемых образцах химические элементы, концентрация которых составляет малые доли процента.

Результаты лабораторных анализов образцов лунного грунта, доставленных на Землю, показали, что, будучи доставленными даже из одного района Луны, они имеют заметные различия в своем составе. Однако несмотря на это, а также на более значительное отли-

чие в составе отдельных фрагментов одного и того же образца, можно выделить ряд наиболее характерных для данного района образцов, имеющих весьма сходный химический состав, к которому близок состав и большинства других образцов данного участка.

Таблица 3

Химический состав (в процентах) образцов лунного грунта, доставленных на Землю

Элементы (окислы)	«Морские» районы		«Материковые» районы	
	«Луна-16» (Море Изобилия)	«Аполлон-15» (Море Дождей)	«Луна-20» (Горный район между Морем Изобилия и Морем Кризисов)	«Аполлон-17» (Тавр-Литров)
SiO ₂	42,95	45,0	44,2	48,5
TiO ₂	5,5	2,54	0,32	0,95
Al ₂ O ₃	13,88	8,9	19,1	17,2
FeO	20,17	22,21	6,91	11,4
MgO	6,05	9,08	13,37	8,94
CaO	10,8	10,27	13,3	11,6
Na ₂ O	0,23	0,28	0,48	0,40
K ₂ O	0,16	0,03	0,47	0,25
Сумма	99,74	98,31	98,15	99,24

Исходя из этого, мы поместили в табл. 3 данные по химическому составу нескольких типичных образцов грунта, доставленных на Землю по программам «Аполлон» и «Луна» из «морских» и «материковых» районов. В таблице приведено соответствующее содержание в них окислов основных пороодообразующих элементов.

Суммарное содержание в грунте элементов, приведенных в таблице (а также фосфора, серы и хрома), обычно составляет ~99%. В количестве от 0,1 до 0,02% присутствуют также цирконий, барий, никель, иттрий и стронций. В еще меньших количествах обнаружены ванадий, ниобий, кобальт, медь, рубидий, углерод и другие химические элементы.

К настоящему времени на Земле имеются образцы грунта, доставленные из 9 районов Луны. Кроме того, непосредственно на поверхности Луны определен состав грунта еще в 5 районах. Поскольку районы, где проводились автоматические анализы, и места, откуда

образцы доставлялись на Землю, находятся на значительных расстояниях друг от друга, трудно было ожидать простого совпадения результатов. Однако результаты лабораторных исследований образцов и автоматических измерений химического состава лунной поверхности хорошо согласуются и взаимно дополняют друг друга. Рассмотрение всей совокупности анализов позволило определить общие закономерности строения всей лунной поверхности: четкое отличие «морских» и «материковых» поверхностей, а также сходный характер образования и эволюции разных «морей» независимо от местоположения того или иного исследованного района.

Логическим продолжением изучения лунной поверхности с помощью автоматических станций явился запуск к Луне 9 августа 1976 г. станции «Луна-24», которая 18 августа 1976 г. совершила посадку в Море Кризисов. На ней было установлено грунтозаборное устройство нового типа, существенно отличающееся от использованных на «Луна-16 и -20». При бурении грунт поступал в гибкую трубку — грунтонос, а специальный механизм подхватывал грунт и удерживал его в виде столбика (в результате совершенно не нарушалась структура образца, сохранялись все особенности его слоистости). Общая глубина бурения составляла 2,25 м.

Как же доставить на Землю такой длинный керн — эта проблема получила на станции «Луна-24» интересное решение. Недаром грунтонос был сделан в виде гибкой трубки — после окончания бурения грунтонос был намотан на барабан, как нитка на катушку, так что получился компактный груз, легко поместившийся в возвращаемый аппарат, который через несколько дней был благополучно доставлен на Землю. Сейчас эти образцы лунного грунта подробно изучаются.

В заключение этого раздела отметим, что в СССР исследованием образцов лунного грунта занимаются многие научные учреждения. До последнего времени этими работами руководил выдающийся советский ученый академик А. П. Виноградов (1895—1975), в течение многих лет возглавлявший Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского.

Лабораторные исследования образцов лунного грунта представляют собой замечательный пример международного сотрудничества ученых. Так, Академия наук

СССР и Национальное управление по аэронавтике и космическим исследованиям США (НАСА) не только осуществили взаимный обмен образцами лунного грунта, но и предоставили их для изучения ученым многих стран.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, химический состав поверхностного слоя лунного грунта исследовался как автоматами непосредственно на Луне, так и в земных лабораториях. Но ведь Луна находится от нас сравнительно «близко» — на расстоянии всего лишь 380 000 км. А каковы перспективы подобных исследований других планет Солнечной системы, в первую очередь ближайших к нам — Марса, Венеры, Меркурия?

Здесь возникают значительные трудности, и дело, к сожалению, не только в огромных расстояниях. Рассматривая те два метода, которые были применены для исследования химического состава грунта на поверхности Луны, можно отметить, что метод «обратно рассеянных альфа-частиц» может быть использован только при работе в вакууме. Кроме того, наличие даже разреженной атмосферы ограничивает использование и рентгеновского флуоресцентного метода, поскольку не позволяет регистрировать мягкое флуоресцентное излучение легких элементов (магния, алюминия, кремния).

Таким образом, исследование химического состава горных пород в их естественном залегании с помощью этих методов возможно лишь на небесном теле, лишенном атмосферы. В противном же случае требуются специальные меры по подготовке образца перед проведением измерения. Серьезную трудность при исследовании Венеры и Меркурия также представляет высокая температура поверхности этих планет.

Большая по сравнению с Луной удаленность планет от нас создает, конечно, и значительные трудности в обеспечении надежной связи с аппаратом, находящимся на планете. Однако в настоящее время осуществляется дальняя связь в космосе на значительно большие расстояния, и основные трудности, связанные с расстоянием, возникают при желании исследовать планету с помощью аппаратов, передвигающихся по ее поверхности.

Время, необходимое для получения на Земле переданного с Луны телевизионного изображения окружающей местности, составляет немногим более 1 с. Столько же времени требуется для того, чтобы команда с Земли была принята самоходным аппаратом. Такие временные интервалы позволяют вполне оперативно следить за обстановкой на местности и вовремя подавать команду на остановку или поворот аппарата. В случае Марса даже при его наибольшем сближении с Землей это время составляет уже около 3 мин (для прохождения сигнала в одну сторону), что значительно усложняет проблему управления самоходным аппаратом с Земли, не говоря о других возникающих при этом проблемах.

При исследовании планет Солнечной системы еще долгое время первенствующая роль будет принадлежать автоматам. К настоящему времени советские и американские автоматические станции, достигшие ближайших к нам планет — Венеры и Марса, позволили получить много новых данных об этих планетах. В рамках материала данной брошюры следует кратко остановиться лишь на одном эксперименте, который является прямым продолжением исследований химического состава грунта, начатых советскими учеными на «Луноходе-1 и -2».

В августе—сентябре 1975 г. в США в сторону Марса были запущены один за другим два космических аппарата — «Викинг-1 и -2». Достигнув примерно через 11 месяцев Марса, они вышли на орбиту искусственных спутников. С орбитальных модулей кораблей на поверхность Марса в разные точки его поверхности, удаленные друг от друга на расстояние около 6500 км, были доставлены спускаемые аппараты.

Среди ряда экспериментов, проводимых этими аппаратами (включавших в себя также и эксперимент по обнаружению органической жизни на Марсе, не давший пока, к сожалению, однозначно интерпретируемых результатов), был и эксперимент по определению химического состава поверхностного слоя грунта Марса методом рентгеновского флуоресцентного анализа. Прибор для проведения этого эксперимента являлся дальнейшим развитием рентгеновской спектрометрической аппаратуры, предназначенной для космических экспериментов.

Марсианский грунт с помощью лопатки миниатюрного экскаватора насыпался в специальную камеру (рис. 13) объемом немногим более 4 см³. Два помещенных рядом радиоактивных источника облучали грунт через окна камеры; через эти же окна проходило ответное флуоресцентное излучение грунта, которое регистрировалось четырьмя детекторами. Для определения вклада элементов, имеющих близкую по значению энергию излучения, применялись фильтры (как и в экспериментах, описанных выше).

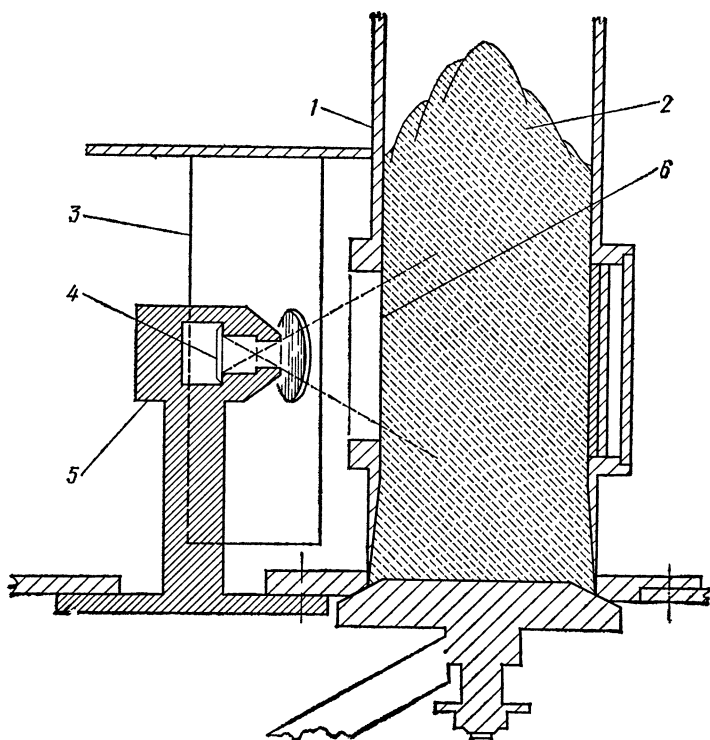


Рис. 13. Схема проведения эксперимента по исследованию химического состава поверхности Марса с помощью аппаратов «Викинг»: 1 — камера, в которую засыпался образец грунта; 2 — образец грунта; 3 — пропорциональный счетчик; 4 — радиоактивный источник (кадмий-109); 5 — коллиматор источника и защитный экран; 6 — тонкое пленочное окно в камере, через которое велся анализ

Был произведен анализ нескольких образцов грунта, взятых в разных точках вблизи посадочных блоков станций (пробы грунта могли быть взяты с глубины до 6 см от поверхности). Этот анализ позволил определить содержание в поверхностном слое Марса основных пороодообразующих элементов — магния, алюминия, кремния, серы, хлора, калия, кальция, титана, железа, — а также оценить концентрацию таких элементов, как, например, рубидий, стронций, иттрий и цирконий.

Полученные результаты оказались весьма любопытными. Сравнение с химическим составом земных и лунных пород показало, что спектр марсианского грунта (рис. 14) не совпадает ни с одним из спектров, полу-

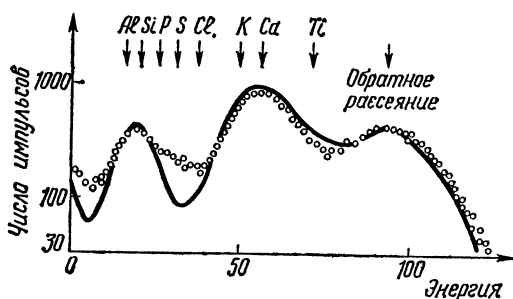


Рис. 14. Спектр флуоресцентного излучения поверхности Марса в месте посадки спускаемого аппарата «Викинга-1». Для сравнения приведен (сплошной линией) наиболее близкий по характеру спектр, полученный при наземных испытаниях. Бросается в глаза значительное содержание серы в марсианском грунте

ченных в наземных экспериментах. Так, например, марсианский грунт содержит мало алюминия, калия и титана, но зато сравнительно богат железом и очень богат серой (см. табл. 4).

Насколько полученные результаты отражают общую картину содержания элементов в поверхностном слое Марса, сказать пока трудно, поскольку анализ производился лишь в двух точках поверхности планеты. Однако первое, что бросается в глаза при сравнении химического состава обоих районов посадки спускаемых аппаратов «Викингов», это то, что состав всех иссле-

Таблица 4

Химический состав (в процентах) марсианского грунта

Элемент	Район посадки спускаемых аппаратов	
	«Викинг-1»	«Викинг-2»
Магний	5,0	—
Алюминий	3,0	—
Кремний	20,9	20,0
Сера	3,1	2,6
Хлор	0,7	0,6
Калий	0,25	0,25
Кальций	4,0	3,6
Титан	0,5	0,6
Железо	12,7	14,2

дуремых образцов грунта оказался практически одинаковым, хотя грунт для анализа брался в весьма удаленных друг от друга точках, с разной глубины и в виде зерен разного размера.

Сравнительно высокое содержание железа на Марсе подтверждает существующее мнение, что красный цвет поверхности этой планеты обязан своим происхождением наличию там окислов железа. Не исключено, что они могут покрывать снаружи зерна других минералов, но это покрытие должно быть тонким или прерывистым.

Все рекорды побила сера: ее содержание в грунте Марса оказалось на один-два порядка больше, чем в земных и лунных породах. Причина такой аномалии пока непонятна, как неясно, например, и то, в виде каких соединений может входить сера в минералы, слагающие поверхность Марса.

Характерным является и низкое содержание калия в марсианском грунте. Оно, по крайней мере, в 5—8 раз меньше, чем в земной коре. Отношение концентраций кальция к калию, составляющее величину порядка 10 (а, возможно, и выше), указывает на то, что поверхность Марса слагают не граниты (как это характерно для Земли).

В поверхностном слое Марса обнаружены стронций, иттрий и цирконий (около 0,01% для каждого элемента). Их количества оказались меньше, чем в земных вулканических породах.

Исследования Марса, как это обычно бывает, дали определенные результаты, но и поставили много новых

вопросов. Многие факты, касающиеся как химического состава поверхности, так и рельефа и существенного различия во внешнем виде поверхности в разных районах, остаются пока загадочными. Однако ясно одно — эти исследования помогут получить ценную информацию о происхождении и эволюции планет Солнечной системы.

Таким образом, метод рентгеновского флуоресцентного анализа, впервые примененный для космического эксперимента на самоходном аппарате «Луноход-1», оказался весьма перспективным методом исследования химического состава вещества планетных тел автоматическими средствами. Исследование Моря Дождей «Луноходом-1», изучение переходной зоны «море—материк» лунной поверхности «Луноходом-2», исследование относительных концентраций легких элементов с орбитальных модулей «Аполлона-15 и -16» и, наконец, работа на поверхности Марса аппаратов «Викинг» — вот путь, который прошел этот метод к настоящему времени. Вывод, сделанный на основании анализа результатов работы советских «Луноходов», о том, что рентгеновская спектрометрическая аппаратура пригодна как для проведения длительных экспериментов в условиях лунной поверхности, так и для исследования других планетных тел, оказался совершенно справедливым.

Сергей Васильевич Викторов
Владимир Иванович Чесноков

ХИМИЯ ЛУННОГО ГРУНТА

Гл. отраслевой редактор *В. П. Демьянов*. Редактор *Е. Ю. Ермаков*. Мл. редактор *Т. И. Полякова*. Обложка *Э. А. Смирнова*. Худож. редактор *М. А. Гусева*. Техн. редактор *Т. Ф. Айдарханова*. Корректор *В. В. Каночкина*.

ИБ № 1004

Т 04223. Индекс заказа 84202. Сдано в набор 16.XI 1977 г. Подписано к печати 11.I 1978 г. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,44. Тираж 32430 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 1983. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 11 коп.

11 коп.

Индекс 70101