

Г. П. ВДОВЫКИН
ЭКЗОБИОЛОГИЯ ЛУНЫ



АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Серия «Проблемы науки и технического прогресса»

Г. П. ВДОВЫКИН
ЭКЗОБИОЛОГИЯ ЛУНЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1975

Исследования Луны и ее вещества, доставленного на Землю с помощью автоматических и пилотируемых космических станций, позволили выяснить основные вопросы экзобиологии (космической биологии) Луны: возможное присутствие лунных форм жизни, условия пребывания человека на Луне, присутствие органогенных (входящих в состав живого вещества) химических элементов и их соединений и получить представление об источниках углерода в веществе лунной поверхности. Эти вопросы и освещены в книге, обобщающей многочисленные недавно полученные с помощью современных методов анализа результаты.

Книга адресована читателям, интересующимся проблемами происхождения жизни и строения Вселенной.

Ответственный редактор
академик

А. П. ВИНОГРАДОВ

ВВЕДЕНИЕ

Экзобиология, или космическая биология, имеет цель проводить поиски возможных внеземных форм жизни и исследовать условия, способствующие их возникновению. До недавнего времени для непосредственного изучения были доступны только те космические посланцы, которые достигают поверхности Земли, — космические лучи (солнечные и галактические), тонкодисперсное космическое вещество (космическая пыль) и метеориты. Для экзобиологии особенно интересны, конечно, метеориты, результаты изучения которых главным образом и послужили основанием для возникновения экзобиологии.

В некоторых очень редких метеоритах, так называемых углистых хондритах, содержатся внеземные органические соединения сложного состава. Эти вещества были тщательно изучены в последние годы. Выяснилось, что это такие же органические (углеродистые) соединения, которые находятся и в земных условиях, где входят в состав живого вещества. От земных биогенных веществ они отличаются в деталях — соотношением отдельных соединений, присутствием в них химических элементов и соединений, не характерных для живого вещества, и т. д. Это говорит о том, что в метеоритах органические соединения образовались без участия живого вещества, в результате природного химического синтеза.

Общее сходство метеоритных и земных органических соединений позволило заключить, что если, во всяком случае в пределах солнечной системы, еще где-либо, кроме Земли, существует жизнь, то она, как на Земле, должна быть основана на углеводе. Следовательно, чтобы получить представление об условиях возникновения жизни в веществе того или иного космического тела, нужно выяснить процесс химической эволюции органических соединений и той среды, в которой происходило превращение углеродистых соединений.

Для перехода от химической эволюции органических соединений к биологической и возникновению высокоорганизованной жизни, как известно, необходимо существование на планете воды и атмосферы. Образование этих оболочек обусловлено дифференциацией всего вещества планеты, имеющей размеры достаточно большие, чтобы гравитационно удерживать легколетучие вещества. Вещество планеты еще на ранней стадии развития, во время агломерации, должно быть несколько обогащено легколетучими элементами — углеродом, водородом (в составе воды) и т. д., что в планетной системе зависит от расстояния от звезды и других факторов. Сочетание таких условий при развитии планетных систем может повторяться и в пространстве, и во времени. В таком аспекте вероятно можно рассматривать положение, выдвинутое академиком В. И. Вернадским, о вечности жизни.

Непосредственное изучение и освоение космического пространства, начатое после впервые осуществленного запуска советского искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г., полета в космическое пространство советского космонавта Ю. А. Гагарина 12 апреля 1961 г., выхода в открытое космическое пространство советского космонавта А. А. Леонова 18 марта 1965 г., значительно расширили и сферу экзобиологии. Интенсивное развитие космонавтики, основанной К. Э. Циолковским, позволило не только уточнить астрономические данные, но получить неопределимые, многие ранее неизвестные характеристики среды и вещества Венеры, Марса, Луны при их непосредственном исследовании с помощью космических аппаратов, при посадке космонавтов на Луну и при лабораторном изучении лунного вещества, доставленного с помощью пилотируемых и автоматических космических станций.

Подробные исследования лунных образцов позволили выяснить основные вопросы экзобиологии Луны — возможное присутствие лунных форм жизни; условия пребывания человека на Луне, т. е. современную среду Луны; присутствие органогенных (входящих в состав живого вещества) химических элементов и их соединений и получить некоторое представление об источниках углерода в веществе лунной поверхности.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУНЫ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

ИЗУЧЕНИЕ РЕЛЬЕФА И ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

Луна вращается вокруг Земли на расстоянии около 384 402 км, которое, кстати, преодолевается современными космическими аппаратами примерно за 70 часов. Диаметр Луны немного больше $\frac{1}{4}$ земного диаметра и составляет 3476 км, ее масса равна 0,012 массы Земли. Средняя плотность Луны $3,34 \text{ г/см}^3$, ускорение силы тяжести $1,62 \text{ м/сек}^2$ — в 6 раз меньше, чем на Земле. Еще в VI в. до н. э. Пифагор показал, что Луна твердое космическое тело, не имеющее своего света, а светится отраженным солнечным светом. Причем свет полной Луны слабее света Солнца почти в 500 тысяч раз. Земля, кстати, также отражает солнечный свет, видимый в телескопах на поверхности Луны как пепельный цвет; а при непосредственном наблюдении с Луны хорошо виден голубоватый цвет Земли, обусловленный присутствием земной атмосферы.

Вокруг собственной оси Луна вращается с периодом 27 дней 7 час. 43 мин. Поскольку время вращения Луны вокруг оси соответствует времени ее обращения вокруг Земли, Луна постоянно повернута к Земле одной стороной. Обратная сторона Луны впервые была увидена на фотографиях, переданных на Землю советской автоматической станцией «Луна-3» 7 октября 1959 г.

Видимая сторона

Подробное топографическое описание видимой стороны Луны составил Галилей в XVII в. Видимая сторона Луны покрыта рядом крупных пониженных участков (моря), перемежающимися с крупными значительно более повышенными участками (материки).

Моря — это обширные равнины с поперечником до 500—1000 км, затопленные, как теперь известно, базальтовой лавой. Названия ряда морей связаны с метеороло-

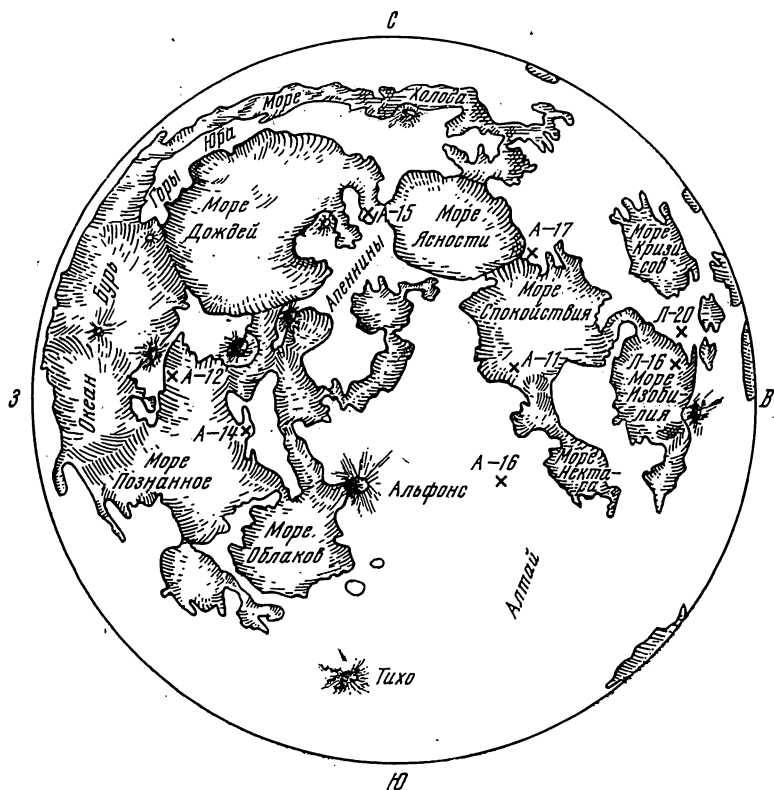


Рис. 1. Видимая сторона Луны.

Крестиками помечены места посадок станций, доставивших образцы Луны

гией, они сохранились с XVII в., когда верили, что Луна влияет на земную погоду. Наиболее крупные моря (с востока на запад) следующие: Море Кризисов, Изобилия, Нектара, Спокойствия, Ясности, Дождей, Океан Бурь. На севере в широтном направлении вытянуто Море Холода. На юго-западе расположены Море Познанное, Влажности, Облаков (рис. 1). Рельеф морей слегка холмистый, но, в отличие от материковых зон, это сравнительно ровные участки (рис. 2).

Форма морей часто округлая, по периферии они окружены кольцевыми горами. Например, Море Дождей

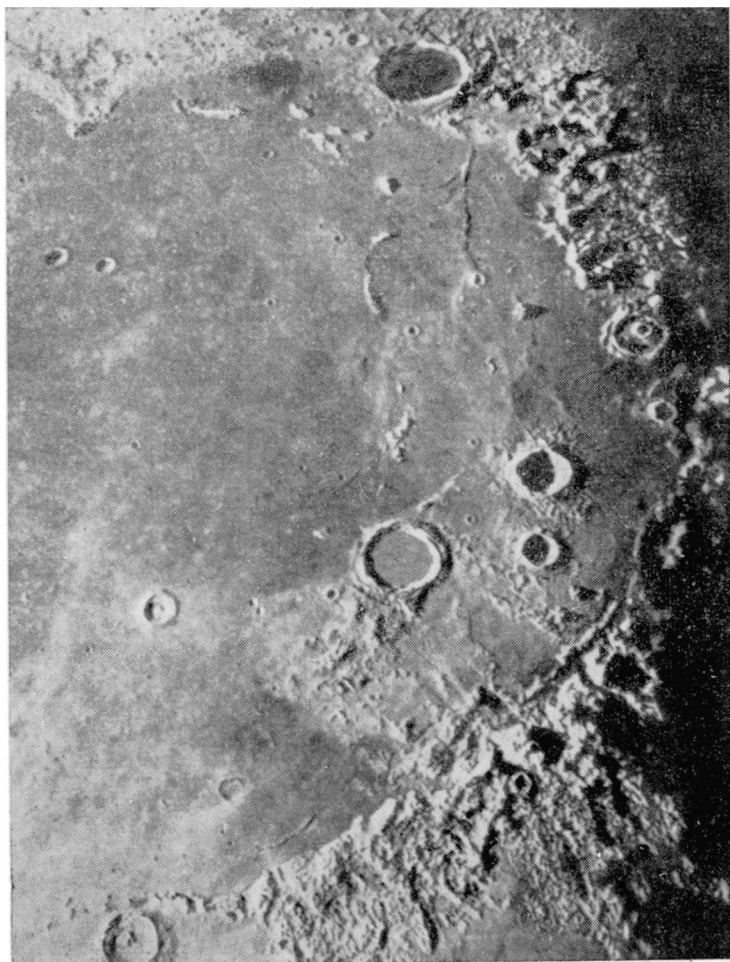


Рис. 2. Морской участок Луны — восточная часть Моря Дождей.

Вверху — кратер Платон (диаметр 90 км) завершает Альпы. Внизу слева — кратер Эратосфен завершает горную цепь Апеннин, в центральной части — кратер Архимед. К юго-востоку от кратера Архимед, на границе с Апенниннами — место посадки «Аполлона-15». В северо-западном участке Моря Дождей работал «Луноход-1».

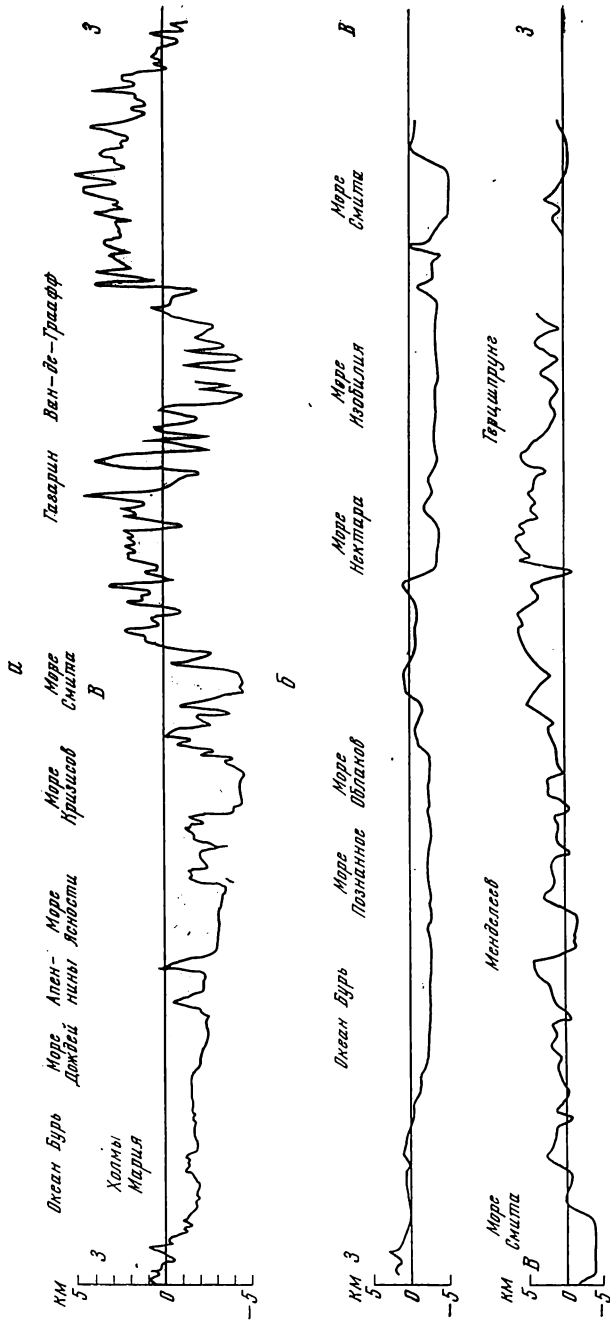


Рис. 3. Профили видимой и обратной сторон Луны по данным лазерной альтиметрии, проведенной при полетах «Аполлона-15» (а) и «Аполлона-16» (б) (по В. М. Каула).

Нулевая линия соответствует лунной сфере с радиусом 1738 км

окружено на северо-западе горами Юра, на востоке — Апеннинами, Альпами, Шпицберген, на юге — Карпатами. Море Ясности на северо-западе ограничено Кавказом и т. д. На территории морских участков часто развиты борозды — желоба протяженностью до сотен километров, валы — вытянутые поднятия высотой до сотен метров, холмы и т. д. Пример таких образований — холмы Мария в западной части Океана Бурь, представляющие собой сочетание борозд, валов и куполов, поднимающихся на сотни метров. Они окружают кратер Мария с диаметром 41 км.

Рельеф материковых участков особенно неровный. На этих участках расположены горные хребты, долины. Они, кроме того, нарушены трещинами до 300 км в длину и до 5 км в ширину, сбросами и т. д. Характерный пример таких нарушений — Прямая Стена, ограничивающая на востоке Море Облаков и имеющая длину 100 км, высоту больше 200 м при крутизне склона до 40°. Материковые участки, по сравнению с морскими, более светлые, поскольку они сложены, как выяснено в последние годы, светлоокрашенными породами — анортозитами. Среднее превышение материковых участков над морскими на видимой стороне Луны составляет примерно 3 км (рис. 3). Наиболее высокая точка — пик Лейбница у южного полюса — возвышается на 9 км.

Характерная черта лунного рельефа — кратеры, имеющие округлую форму и размеры от гигантских до очень мелких. Они распространены и на материковых участках, и на морских. Гигантских кратеров сравнительно немного, но мелкими кратерами покрыта вся поверхность Луны. Размеры крупных кратеров иногда превышают 100 км. Такие кратеры часто имеют центральную горку. Кратеры окружены валом высотой до 5 км, а иногда системой концентрических валов. Наиболее крупные кратеры на материковых участках видимой стороны Луны — Птоломей, Альфонс, Коперник, Тихо, Платон и др. От вала кратера, как правило в радиальном направлении, иногда на сотни километров тянутся светлые лучи. Предполагают, что это вещество, выброшенное при формировании кратеров.

Обратная сторона

Исследования Луны с помощью космических аппаратов начались со 2 января 1959 г., когда советская автоматическая станция «Луна-1», запущенная в сторону Луны, пролете-

ла от ее поверхности на расстоянии нескольких тысяч километров, вышла на гелиоцентрическую орбиту и стала первым искусственным спутником Солнца. Для запуска этого первого в истории космонавтики лунника необходимо было разработать сложные условия достижения второй космической скорости (11,2 км/сек).

На основании данных, переданных автоматической станцией «Луна-2», которая осенью 1959 г. совершила прилунение, сделано заключение, что Луна не обладает заметным магнитным полем и у нее отсутствуют радиационные пояса. Спустя месяц автоматическая станция «Луна-3» впервые сфотографировала обратную сторону Луны и передала ее изображение на Землю. В июле 1965 г. автоматическая станция «Зонд-3» при полете около Луны вновь сфотографировала ее обратную сторону. По этим фотографиям были впервые составлены полная карта и глобус Луны.

На обратной стороне Луны преобладают материковые участки с очень сложным рельефом. Превышение гористых зон над средним уровнем достигает 5 км. Наиболее крупный из хребтов — Советский. Моря на обратной стороне немногочисленны, и они меньше по размерам, чем на видимой стороне. Из них наиболее крупные — моря Мечты, Москвы, Гумбольдта, Смита и др. На обратной стороне Луны также распределены кратеры, среди них кратеры Ломоносов, Циолковский, Попов, Джордано Бруно, Жюлио-Кюри, Герц и др.

Кратеры Луны — разновозрастные. Наиболее хорошо они изучены на видимой стороне Луны. Здесь более сохранившиеся кратеры иногда находятся на более разрушенных, причем последние подчас заполнены базальтовой лавой и от них сохранились очертания по осевым частям вала. Хорошо известна дискуссия о том, что в формировании кратеров Луны играли роль либо эндогенный процесс, связанный с вулканическим извержением лавы, либо экзогенный фактор, связанный с выбросом вещества при ударах метеоритов о лунную поверхность и происходившими при этом взрывными явлениями. Второй фактор особенно защищался А. Вегепером (автором известной гипотезы о раздвижении земных материков), который считал, что все кратеры и округлые моря Луны образованы ударами метеоритов. Современные данные позволяют считать, что формирование основных черт лунного рельефа

произошло на ранних стадиях развития Луны, причем вероятно имели значение оба фактора — и эндогенный, и экзогенный. О существовании вулканического извержения говорит присутствие лавовых потоков, образовавших кристаллические породы, о метеоритных ударах свидетельствует аналогия строения лунных метеоритных кратеров (по крайней мере, относительно мелких) с земными метеоритными кратерами и присутствие на Луне частиц метеоритного вещества.

На территории ряда округлых морей, главным образом на видимой стороне Луны, но также и на обратной (моря Дождей, Ясности, Кризисов, Влажности, Нектара, Гумбольдта, Кольцевое, Смита, Залив Зноя) в последнее время обнаружены масконы — районы с аномальным увеличением силы тяжести. Высказано предположение, что они обусловлены присутствием на глубине около 100 км тел, возможно, внелунного происхождения. Не ясно — не обусловило ли возможное падение этих внелунных тел на ранних стадиях развития Луны излияние лав; либо излияние лав и образование лунных морей обусловлено падением расплывшихся при взрыве гигантских метеоритов, орбиты которых проходили между Луной и Землей (из-за возмущающего влияния этих космических тел); либо излияние лав было обусловлено действием притяжения Земли. Во всяком случае, существенным, если не решающим, при формировании основных черт как видимой, так и обратной сторон Луны является сложное взаимовлияние сил притяжения Земли и Луны, находящихся, в свою очередь, в поле тяготения Солнца. Достаточно вспомнить, что Луна оказывает воздействие на водную оболочку Земли, вызывая ежедневно по два прилива: их высота, например, в Белом море достигает 6,5 м, в Охотском море 11 м, а на Атлантическом побережье Канады даже 16 м.

Строение лунной поверхности

Запуски первых советских лунников и запуски американских космических аппаратов типа «Рейнджер», сфотографировавших поверхность Луны при подлете к ней, позволили получить более подробные сведения о деталях лунного рельефа. Однако, о строении лунной поверхности могли судить фактически только по альбедо лунных образований. Высказывались соображения о том, что Луна,

возможно, покрыта очень тонкозернистым несконсолидированным слоем пыли мощностью в сотни метров. Это означало, что космическая станция, посаженная на лунную поверхность, может утонуть в этом слое.

3 февраля 1966 г. советская автоматическая станция «Луна-9», стартовавшая 31 января, достигла поверхности Луны и впервые осуществила на нее мягкую посадку. В течение трех дней станция передавала на Землю изображение круговой панорамы непосредственно с лунной поверхности из участка между кратерами Галилей и Кавальери западной части Океана Бурь. В течение 8 час. 05 мин. действовал прямой радиомост. Поверхность, как оказалось, сравнительно ровная, но нарушена многими бугорками, лунками, впадинами, причем размеры впадин от 10 см до 2—3 м. Поверхность состоит из мелких частиц вещества. На ней рассеяны камни размером до 10—20 см. Так были получены первые сведения о микроструктуре лунной поверхности. Стало ясно, что лунный грунт способен выдержать динамическую нагрузку при посадке космического аппарата и длительную статическую нагрузку без значительных деформаций. Предположение о мощном рыхлом пылевом покрове не подтвердилось.

В дальнейшем более подробные сведения о прочностных характеристиках лунной поверхности были получены с помощью советской космической станции «Луна-13», осуществившей мягкую посадку 24 декабря 1966 г., и американского космического аппарата «Сервейор-1». Оба прилунились на территории Океана Бурь. Грунтомер-пенетrometer и радиационный плотномер «Луны-13» были вынесены на расстояние 150 см от корпуса станции, и грунтомер осуществил проникновение в поверхность Луны. На аппарате «Сервейор» был установлен механический манипулятор с ковшом для рытья поверхностного слоя. Результаты экспериментов показали, что поверхностный слой, имеющий светло-коричневый цвет, представлен слабо связанным материалом. Его плотность в пределах верхних 5—20 см $1-1,5 \text{ г/см}^3$. Верхний, относительно малопрочный слой толщиной от нескольких сантиметров до нескольких метров находится на твердых горных породах.

Вместе с этим проводились исследования состава лунных пород. Стартовавшая 31 марта 1966 г. автоматическая станция «Луна-10», на которой был установлен гамма-спектрометр, 3 апреля перешла на селеноцентрическую

орбиту и превратилась в первый искусственный спутник Луны. Измерения γ -активности, связанной с присутствием в породах Луны урана, тория, калия-40, показали, что содержание этих элементов в породах лунных морей сходно с их содержанием в земных базальтах, и, следовательно, лунные моря сложены базальтами. Станция проводила, кроме того, гравитационные и топографические исследования Луны. Автоматической станцией «Луна-12», также с орбиты искусственного спутника Луны, с помощью рентгеновского фотометра обнаружено рентгеновское излучение, испускаемое атомами магния и алюминия в лунном грунте, которое возбуждается коротковолновой солнечной радиацией. Осуществившие затем посадку на поверхность Луны космические станции типа «Сервейор» подробно проанализировали химический состав лунных пород. Анализ проводился с помощью источника α -частиц.

Станция «Сервейор-5» прилунилась в 10-метровом кратере в Море Спокойствия, «Сервейор-6» — в Заливе Центральном, «Сервейор-7» — на северном внешнем вале кратера Тихо материкового участка. По данным обратного рассеяния α -частиц, химический состав лунной поверхности на морских территориях следующий (в %): SiO_2 — 46,4; 49,1; MgO — 4,4; 6,6; FeO — 12,1; 12,4; Al_2O_3 — 14,4; 14,7; CaO — 14,5; 12,9; Na_2O — 0,6; 0,8; TiO_2 — 7,6; 3,5, а на материковом участке, соответственно, SiO_2 — 46,1; MgO — 7,0; FeO — 5,5; Al_2O_3 — 22,3; CaO — 18,3; Na_2O — 0,7; TiO_2 — 0. Следовательно, на материковом участке, по сравнению с морскими, меньше Fe и больше Al, т. е. их состав более полевошпатовый. На панораме, переданной «Сервейором-7» в январе 1968 г. с материкового участка Луны, видны нагромождения камней и больших глыб.

Следующий важнейший этап в планомерном изучении Луны после осуществления мягкой посадки и создания искусственного спутника Луны — возвращение станции с селеноцентрической орбиты на Землю. Эта задача была успешно решена запуском 15 сентября и возвращением 21 сентября 1968 г. автоматической станции «Зонд-5», а затем «Зонд-6, -7 и -8», осуществивших облет Луны, возвращение на Землю со второй космической скоростью и приземление спускаемого аппарата. С помощью этих станций были проведены важные научные исследования. Космической станцией «Зонд-6», а также аппаратами серии «Лунар орбитер» проведены фотографирования дета-

лей обратной стороны Луны. Станция «Зонд-7» произвела новые измерения физических параметров окололунного пространства, новые фотографирования обеих сторон Луны и Земли. Во время первого сеанса 8 августа 1969 г. произведено фотографирование Земли на удалении от нее 70 тысяч км, при втором сеансе 11 августа — фотографирование на расстоянии 10 тысяч км от Луны, через час при третьем сеансе сфотографирована обратная сторона Луны с высоты 2 тысяч км.

Последовательные стадии программ изучения Луны завершились высадкой 20 июля 1969 г. на поверхность Луны космонавтов пилотируемого космического корабля «Аполлон-11», доставивших на Землю лунные образцы, и автоматическим отбором 20 сентября 1970 г. «Луной-16» образцов лунного реголита, доставленного на Землю 24 сентября. Впервые в практике космонавтики была произведена посадка на Луну автоматической станции с орбиты искусственного спутника Луны. Из различных участков видимой стороны лунной поверхности было на Землю доставлено вещество из 8 станций. Они включают 5 посадок на морских территориях и 3 посадки — на материковых, причем вещество из особенно труднодоступных материковых зон было доставлено на Землю вначале автоматической космической станцией «Луна-20» в феврале 1972 г. Как инженерно-техническое, так и научное значение этих полетов очень велико. Непосредственное изучение доставленных образцов дало возможность получить точные сведения о составе лунной поверхности, о возрасте вещества, об органогенных соединениях и т. д. Многие предыдущие соображения о Луне, основанные главным образом на косвенных данных, были отброшены, хотя возникло много новых научных вопросов. Полеты станций, доставивших на Землю образцы Луны, дальше рассматриваются подробнее.

Результаты полета автоматических и пилотируемых космических аппаратов подтвердили, что как морские, так и материковые участки Луны покрыты многочисленными кратерами различного размера, воронками и мелкими лунками. Поверхностный слой сложен реголитом мощностью от 0,5 до 10 м. Непосредственно с поверхности реголит довольно рыхлый, так что в нем на глубину несколько сантиметров остаются отпечатки ног космонавтов. Реголит состоит из частиц размером около 1 мм. Это частицы базальта, брек-

чий, а также анортозита, оплавленные частицы и т. д. Их форма часто неправильная, угловатая. Кроме того, в реголите встречаются сферические частицы стекла и др. Особенно крупные обломки пород, доставленные из морских территорий космонавтами экспедиций «Аполлона», — главным образом базальты.

Крупным шагом дальнейшей программы изучения Луны является доставка на ее поверхность сконструированных автоматических самоходных лабораторий типа «Луноход», имеющих не автономное, а дистанционное управление с Земли, способных работать на Луне в условиях сверхвысокого вакуума и выдерживающих на Луне большие перепады температур, когда в разгар лунного дня температура поднимается до $+140^{\circ}$, а ночью опускается до -170° С.

Автоматическая космическая станция «Луна-17» с аппаратом «Луноход-1» стартовала 10 ноября 1970 г. Самоходная лаборатория, оборудованная разнообразной аппаратурой, была доставлена 17 ноября в северо-западный район Моря Дождей, к югу от мыса Гераклид. Ее передвижение осуществлялось с помощью восьмиколесного шасси. За 11 лунных дней (или 10,5 месяцев) работы луноход прошел 10,54 км пути, обследовав около 80 тысяч м^2 лунной поверхности, передал больше 200 панорам и больше 20 тысяч снимков окружающей местности. По трассе производилось изучение физико-механических свойств грунта и определялся его химический состав. Установленный на луноходе французский уголкового отражатель был использован для лазерной локации Луны. На обследованной территории толщина рыхлого слоя реголита — не меньше 6—8 см, причем его самый верхний слой 1—2 см имеет наиболее рыхлую структуру и меньшую несущую способность. Реголит по химическому составу близок к базальтам.

16 января 1973 г. на восточную окраину Моря Ясности в кратер Лемонье автоматической станцией «Луна-21» доставлен «Луноход-2». В течение первых двух лунных дней аппарат передвигался на юг в направлении материкового района. После подробного изучения прибрежных участков, лаборатория была направлена на восток, к крупному тектоническому разлому. За 5 лунных дней, до начала июня 1973 г., луноход преодолел в условиях сложного рельефа 37 км, передал на Землю 86 панорам и больше 80 тысяч снимков лунной поверхности. По трассе движения лунохода также производились измерения физико-механических

свойств и химического состава реголита; проводилось изучение вариаций магнитного поля и намагниченности пород, измерения светимости лунного неба и т. д. Результаты, в частности, показали, что на поверхности Луны магнитное поле неоднородно. Сделано также предварительное заключение, что Луна окружена слоем пылевых частиц, сильно рассеивающих видимый солнечный свет и отраженный свет Земли.

ДОСТАВКА ЛУННЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ПОЛЕТАХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ

Образцы с поверхности Луны были доставлены на Землю при пилотируемых полетах космических кораблей «Аполлон» и при полетах автоматических станций «Луна» из 6 районов восточной половины и 2 районов западной половины видимого полушария Луны. Доставленными образцами охарактеризованы следующие районы Луны: морские участки — Море Изобилия («Луна-16»), Море Спокойствия («Аполлон-11»), район Хэдли-Аппеннины («Аполлон-15»), район Фра Мауро («Аполлон-14»), Океан Бурь («Аполлон-12»); материковые участки — материк между Морем Изобилия и Морем Кризисов («Луна-20»), район Тавр-Литтров («Аполлон-17»), кратер Декарт («Аполлон-16») (рис. 1, табл. 1).

Автоматические космические станции «Луна-16» и «Луна-20»

Советская автоматическая космическая станция «Луна-16» стартовала к Луне 12 сентября 1970 г. 17 сентября станция была выведена на селеноцентрическую круговую орбиту с высотой 110 км, а затем переведена на эллиптическую орбиту с высотой в периселении 15 км и апоселении 110 км, далее — 106 км, с которой 20 сентября в 8 час. 18 мин. совершила мягкую посадку в намеченном районе Моря Изобилия в экваториальном восточном участке видимой стороны Луны, в 100 км к западу от кратера Уэбб. Это море, не имеющее кольцевого гористого обрамления, представляет собой равнину с относительно невысокими валами, поднимающимися на 100—300 м. После посадки по команде с Земли грунтозаборное устройство специальной конструкции произвело бурение грунта. Бур углубился

Таблица 1

Районы Луны, охарактеризованные доставленными образцами

Станция	Дата запуска	Место посадки КК на Луну	Селенографические координаты	Территория	Дата отбора лунных образцов
Автоматическая станция «Луна-16»	12 сентября 1970 г.	Море Изобилия	0°, 7 ю. ш., 56°, 3 в. д.	морская	20 сентября 1970 г.
Автоматическая станция «Луна-20»	14 февраля 1972 г.	Материк между Морем Изобилия и Морем Кризисов	3°, 5 с. ш., 56°, 5 в. д.	материковая	21 февраля 1972 г.
«Аполлон-11»	16 июля 1969 г.	Море Спокойствия	0°, 7 с. ш., 23°, 5 в. д.	морская	20 июля 1969 г.
«Аполлон-12»	14 ноября 1969 г.	Океан Бурь	3°, 2 ю. ш., 23°, 4 з. д.	морская	19—20 ноября 1969 г.
«Аполлон-14»	31 января 1971 г.	Кратер Фра Мауро	3°, 7 ю. ш., 17°, 5 з. д.	морская, вблизи материковой	5—6 февраля 1971 г.
«Аполлон-15»	26 июля 1971 г.	Борозда Хэдли (восточная часть Моря Дождей)	26°, 1 с. ш., 3°, 6 в. д.	морская, вблизи материковой	30 июля — 1 августа 1971 г.
«Аполлон-16»	16 апреля 1972 г.	Кратер Декарт, материк между Морем Нектара и Морем Облаков	9°, 0 ю. ш., 15°, 5 в. д.	материковая	21—23 апреля 1972 г.
«Аполлон-17»	7 декабря 1972 г.	Лощина Тавр, кратер Литтров	20°, 2 с. ш., 30°, 7 в. д.	материковая	11—13 декабря 1972 г.

в грунт на глубину 35 см. Отобранные образцы грунта весом 101 г были автоматически помещены в герметический контейнер возвращаемого аппарата. На Луне станция находилась 26 час. 25 мин. Кроме забора грунта, она производила температурные, радиационные измерения и другие исследования. В 10 час. 43 мин. 21 сентября, используя посадочную ступень станции как стартовую платформу, космическая ракета с возвращаемым аппаратом стартовала с поверхности Луны. 24 сентября космическая ракета со второй космической скоростью приблизилась к Земле. Перед входом в атмосферу возвращаемый аппарат отделился от космической ракеты, вошел в плотные слои атмосферы и продолжал снижение по баллистической траектории. После аэродинамического торможения была приведена в действие его парашютная система, и возвращаемый аппарат произвел мягкую посадку в расчетном районе Казахской ССР. В возвращаемом аппарате находился герметизированный контейнер с образцами лунного грунта.

Контейнер был вскрыт в специальной чистой приемной лунной камере, заполненной гелием, где грунт был помещен на специальный лоток. Это — темно-серый порошок, внешне несколько похожий на вещество метеоритов — углистых хондритов в порошке. Он разнозернистый, при среднем размере зерен примерно 0,1 мм. Зерна округлые или угловатые. Внизу, у забоя, зерна наиболее крупные. Объемный вес реголита 1,17 г/см³. Это зерна базальта, габбро, анортозита, брекчии, шлаки и спеки, стекла, мономинеральные зерна, сферические частицы.

Автоматическая космическая станция «Луна-20» впервые доставила на Землю вещество Луны из типичного материкового участка. Эта станция стартовала с Земли 14 февраля 1972 г. 21 февраля в 22 час. 19 мин. она осуществила мягкую посадку в гористой материковой области Луны между Морем Изобилия и Морем Кризисов, в 33 км к северу от побережья Моря Изобилия; в 120 км к северу от места посадки «Луна-16», в нескольких километрах к западу от вала кратера Аполлоний-С диаметром 10 км и глубиной примерно 1 км. Рельеф полого-холмистый, с хребтообразными поднятиями и котловинами. Непосредственно в месте посадки станции поверхность относительно ровная, полого-холмистая. Посадка совершена на восточном склоне одного из холмов, крутизна склона кото-

рого 8—10°. На фотографиях видны кратеры размером до 1 м с пологими склонами и камни размером до 3 см.

23 февраля, после отбора лунного реголита с помощью автоматической буровой установки, в 1 час. 58 мин. космическая ракета с возвращаемым аппаратом стартовала с Луны. 25 февраля она приблизилась к Земле, и в 22 час. 12 мин. возвращаемый аппарат совершил посадку в расчетном районе Казахской ССР. Герметизированный контейнер был вскрыт в приемной гелиевой камере, и реголит был помещен на лоток. Грунт представляет собой рыхлый разнородный порошок светло-серого цвета. Средний размер зерен примерно 0,08 мм. Он состоит из остроугольных обломков пород и минералов. Оплавленных и сферических стеклянных частиц в нем меньше, чем в грунте, доставленном «Луной-16». Значительная часть в реголите (50—60%) представлена зернами анортозита, состоявшими главным образом из полевого шпата (плагиоклаза). Присутствуют троктолит, базальтовые частицы, стекла, оливин и т. д. Предполагают, что в составе этого реголита существенную роль могли играть выбросы из сравнительно молодого кратера Аполлоний-С при его формировании.

Следовательно, вещество материковых участков, которые являются более древними, чем моря, представлено анортозитовыми породами, моря сложены базальтами.

Экспедиции «Аполлон»

Американская программа «Аполлон» имела цель высадку космонавтов на Луну. К началу 1973 г., когда программа была закончена, было осуществлено 6 высадок космонавтов в разных районах на видимой стороне Луны. Космонавты отобрали образцы Луны, выполнили другие научные задачи и вернулись на Землю. Общая стоимость программы «Аполлон» была оценена в 26 млрд. долларов. Следует отметить, что экспедиции были рискованными, и почти ни одна из них не была лишена тех или иных технических неполадок, которые устранялись мужественными космонавтами в процессе полета. Технические неполадки при полете «Аполлона-13» были настолько существенными, что экипаж не смог высадиться на Луну и вынужден был вернуться на Землю. Научные результаты, полученные экспедициями «Аполлон», очень существенны. При

пилотируемых полетах из каждого района посадки было доставлено на Землю от 22 до 113 кг образцов Луны. В одной из высадок на Луну, кстати, принимал участие геолог Х. Шмитт. Образцы чаще всего отбирались в отдалении от места посадки лунного отсека и, следовательно, не были контаминированы (загрязнены) соединениями органических элементов из выхлопов лунного отсека.

Трехместный управляемый космический корабль (КК) «Аполлон», запускаемый с помощью трехступенчатой ракеты-носителя «Сатурн-5» (вес ракеты 2700 т), состоит из служебного, командного и лунного отсеков. Стартовый вес полностью заправленного топливом КК «Аполлон» превышает 40 т. В то время как корабль находится на селеноцентрической орбите, лунный отсек с двумя космонавтами осуществляет мягкую посадку на поверхность Луны. При последующем старте посадочная ступень служит стартовой платформой для взлетной ступени. Затем, после стыковки взлетной ступени с кораблем и перехода космонавтов в командный отсек, взлетная ступень отстреливается. При возвращении, перед входом в атмосферу Земли, отстреливается служебный отсек, предназначенный для размещения двигательной установки и системы жизнеобеспечения космонавтов и питания приборов. Командный отсек с тремя космонавтами приводняется с помощью парашютов.

Испытания КК «Аполлон» с космонавтами проходили с 1968 г. «Аполлон-7» и «-9» испытывались на околоземных орбитах. «Аполлон-8», запущенный в декабре 1968 г. с космонавтами Ф. Борманом, Дж. Ловеллом и У. Андерсом, а затем «Аполлон-10», запущенный в мае 1969 г. с космонавтами Т. Стаффордом, Ю. Сернаном и Дж. Янгом, испытывались на селеноцентрической орбите, причем Стаффорд и Сернан, находясь в лунном отсеке, совершали маневры с минимальным удалением от поверхности Луны в 15 км. Эксперименты проводились с целью проверки работы лунного отсека и выбора места высадки на Луну. Космонавты, кстати, сообщили, что поверхность Луны в основном коричневого и серого цвета.

16 июля 1969 г. со стартовой площадки космодрома на мысе Кеннеди, теперь снова переименованного в мыс Канаверал, произведен запуск КК «Аполлон-11» весом 43,9 т с тремя космонавтами — Н. Армстронгом, Э. Олдрином и М. Коллинзом. Летчик-испытатель Армстронг командовал

«Джемини-8», Олдрин в ноябре 1966 г., будучи членом экипажа «Джемини-12», выходил в открытый космос, Коллинз пилотировал «Джемини-10». 20 июля Армстронг и Олдрин отделили лунный отсек от командного, где остался Коллинз, и начали самостоятельный полет. Через 56 минут они включили тормозной двигатель и перевели лунный отсек на траекторию к месту посадки. Лунный отсек прилунился в юго-западной части Моря Спокойствия, на сравнительно ровной поверхности, в 2 км от кратера Западного и в 25 км к юго-востоку от места посадки «Сервейора-5». Через 7 часов после посадки Армстронг ступил на поверхность Луны. Грунт оказался довольно прочный, пепельно-серого цвета. Вскоре к Армстронгу присоединился Олдрин. Первые слова, произнесенные Армстронгом на поверхности Луны, были: «Один маленький шаг человека — огромный шаг человечества». Космонавты провели на Луне 21 час, из которых около 3 часов работали непосредственно на лунной поверхности. Они собрали 85 лунных образцов общим весом 22 кг непосредственно около лунной кабины и на удалении до 60 м от нее, установили ряд приборов и произвели фотографирования. В 20 час. 54 мин. 21 июля взлетная ступень стартовала с поверхности Луны. Оставленный на поверхности Луны сейсмометр зарегистрировал момент взлета лунной кабины. 24 июля в 19 час. 50 мин. «Аполлон-11» приводнился в Тихом океане к юго-западу от кораллового атолла Джонстон. Для проверки возможного приноса с Луны патогенных (болезнетворных) микроорганизмов на космонавтов и на доставленные ими образцы был наложен карантин до 12 августа, причем сразу же в Хьюстоне началось изучение лунного вещества.

Высадка человека на поверхность Луны является крупным шагом космонавтики. Академик Л. И. Седов 23 июля 1969 г. в газете «Правда» писал: «Наряду с такими взаимосвязанными знаменательными достижениями, как запуск первого искусственного спутника Земли, первый полет Юрия Гагарина, первый выход космонавта Алексея Леонова в открытый космос, первые запуски автоматических аппаратов к Луне, к Венере и Марсу, выход человека на Луну войдет в летопись двадцатого века как важное событие».

14 ноября 1969 г. к Луне стартовал КК «Аполлон-12» (общим весом 44,3 т) с космонавтами Ч. Конрадом, А. Би-

ном и Р. Гордопом. Лунный отсек, управляемый Конрадом и Бинном, прилунился 19 ноября в восточной части Океана Бурь к юго-западу от кратера Коперник, в 180 м от «Сервейора-3», который совершил мягкую посадку на склоне 200-метрового кратера 19 апреля 1967 г. Грунт здесь оказался более мягким, чем в месте посадки «Аполлона-11»; он серого цвета, но покрыт густым слоем черной пыли. На территории посадки паходится ряд кратеров диаметром 3—330 м, среди них кратеры Хэд и Сервейор. Космонавты пробыли на Луне 31 час и совершили две экскурсии общей продолжительностью 7,5 часов; они собрали 77 лунных образцов общим весом 34 кг, установили научную аппаратуру и демонтировали детали аппарата «Сервейор-3» для возвращения на Землю. Его металлические детали легко резались, а кабель стал очень хрупким. 20 ноября космонавты стартовали с Луны. После отделения взлетной ступени от основного блока она упала на Луну в 72 км от установленного сейсмометра. Сейсмические колебания, вызванные падением, неожиданно регистрировались более получаса, хотя предполагалось, что они затихнут через несколько минут. Обратная сторона Луны, по мнению Конрада, по цвету напоминает земные пустыни. 24 ноября «Аполлон-12» приводнился в Тихом океане к юго-востоку от островов Самоа. До 10 декабря космонавты находились на карантине.

11 апреля 1970 г. произведен запуск КК «Аполлон-13» с космонавтами Дж. Ловеллом, принимавшем участие в полете вокруг Луны «Аполлона-8», Ф. Хейсом, Дж. Суиджертом. Полет был рассчитан на 10 дней с высадкой космонавтов в районе кратера Фра Мауро. В ночь с 13 на 14 апреля, из-за аварии в основном блоке, вышла из строя энергетическая установка. «Аполлон-13» совершил облет Луны и был переведен на траекторию возвращения. В течение 4 дней до подхода к Земле космонавты пользовались системой жизнеобеспечения, действовавшей только в лунной кабине. 18 апреля отсек экипажа приводнился в Тихом океане. Намеченный на 1 октября 1970 г. очередной запуск КК «Аполлон» был перенесен на начало 1971 г.

«Аполлон-14» с космонавтами А. Шепардом, Э. Митчеллом, С. Русой стартовал 31 января 1971 г. 4 февраля он вышел на селеноцентрическую орбиту с высотой периселения 108 км и высотой аписеления 124 км. 5 февраля

Шепард и Митчелл прилунились в лунной кабине между группой кратеров Триплет и Дублет к северу от крупного кратера Фра Мауро, находящегося в 1230 км к югу от центра Моря Дождей. Поверхность Луны здесь покрыта веществом, выброшенным из Моря Дождей при его формировании. Космонавты поместили оборудование на ручную двухколесную тележку и совершили экскурсию длительностью $4\frac{3}{4}$ час., в процессе которой они собрали образцы и на расстоянии 300 м от лунной кабины разместили научное оборудование. На следующий день утром они попытались достичь 300-метровый кратер Коун, находящийся на расстоянии 1,1 км. Но с приближением к кратеру камни становились все больше (до 1,5 м). Космонавты были вынуждены вернуться к кабине, причем обратный путь был проделан через кратер Уэйрд. За время пребывания на Луне было собрано 43 кг образцов. 6 февраля взлетная ступень состыковалась с основным блоком и через 5 часов маршевый двигатель обеспечил переход корабля на траекторию его полета к Земле.

«Аполлон-15» стартовал к Луне 26 июля 1971 г. На его борту находились космонавты Д. Скотт, участник полетов на «Джемини-8» и «Аполлон-9», Д. Ирвин, А. Уорден. Лунный отсек, управляемый космонавтами Скоттом и Ирвином, прилунился 30 июля на восточной окраине Моря Дождей, к востоку от борозды Хэдли — извилистой впадины, которая протягивается параллельно Апеннинам, возвышающимся на многие сотни метров над поверхностью морской территории. Космонавты трижды выходили на поверхность Луны и провели вне кабины 18,5 часов. Они передвигались с помощью четырехколесного вездехода, на котором 1 августа была совершена экскурсия к подножью Апеннин и борозде Хэдли. Космонавты собрали на поверхности Луны больше 350 образцов общим весом 77 кг, установили приборы в пробуренные скважины и провели фотосъемку. 1 августа космонавты стартовали с поверхности Луны. Находясь на лунной орбите, они запустили небольшой спутник с целью фотографирования и передачи на Землю изображения лунной поверхности. На трассе полета к Земле Уорден вышел в открытый космос и из фотокамер, установленных в двигательном отсеке корабля, извлек кассеты со снимками Луны. 12-дневный очень напряженный полет, при котором были технические осложнения, благополучно закончился 6 августа при-

воднением в Тихом океане к северу от Гавайских островов. В отличие от предыдущих участников экспедиций «Аполлона», космонавты не проходили карантин из-за отсутствия лунных микроорганизмов.

16 апреля 1972 г. произведен запуск ракеты-носителя «Сатурн-5» с РК «Аполлон-16» с экипажем в составе Дж. Янга, пилотировавшего «Аполлон-10» при его полетах вокруг Луны, Ч. Дьюка и Т. Маттингли. При полете к Луне проводились наблюдения вспышек-фосфенов, зарегистрированных при предыдущих полетах космонавтов на «Аполлоне», осуществлялся эксперимент по электрофорезу в условиях невесомости, проводились биологические и другие наблюдения. Посадка лунной кабины из-за неисправности была задержана на 6 часов и осуществлена утром 21 апреля. Высадка произошла в очень интересном районе — горном материковом плоскогорье между Морем Нектара и Морем Облаков, к северу от кратера Декарт.

Это была первая посадка американских космонавтов на типичном материковом нагорье. Территория нарушена многочисленными кратерами и горами. В центре кратера, склоны которого поднимались под углом 30° , и произвела посадку лунная кабина, причем в 3 м от нее была воронка глубиной 10 м, а рядом с кабиной лежал огромный камень. Участок посадки был покрыт 15-сантиметровым слоем лунной пыли, затруднявшем передвижение. Космонавты пробыли на лунной поверхности 71 час, совершили 3 выхода общей продолжительностью 20 часов и проделали путь в 27 км.

Как и в предыдущей экспедиции «Аполлона», космонавты передвигались на электровездеходе. Около лунной кабины они развернули комплект научных приборов и пробурили 3 скважины глубиной до 3 м. В районе посадки магнитометр зарегистрировал самую высокую из замеренных на Луне величину напряженности магнитного поля — до 300 гамм.

Были проведены сейсмические исследования. Анализ колебаний при взрыве показал, что реголит простирается, возможно, до глубины 45 м. После установки научного оборудования Янг и Дьюк совершили поездку к кратеру Флэг, где собрали образцы пород, а затем к кратеру Спук; около 90% площади кратера покрыто остроугольными



Рис. 4. Общий вид участка долины Тавр.

Слева — космонавт «Аполлона-17» геолог Х. Х. Шмитт.

камнями. Протяженность этого маршрута составила 4 км, продолжительность 7 часов.

22 апреля космонавты вторично вышли на поверхность Луны и совершили путешествие к горе Стоун для поисков следов вулканической деятельности. Этот выход космонав-

тов, когда они проделали путь в 11,5 км, длился 7,5 часов. 23 апреля Янг и Дьюк во время третьего выхода совершили поездку к кратеру Норс-Рей, глубина которого достигает 400 м. Края кратера и его дно усеяны крупными камнями, достигавшими высоты 10—15 м. Всего космонавты собрали 97,5 кг образцов (наибольший весил 18 кг) и получили колонку грунта длиной 2,7 м. Один из доставленных на Землю в вакуумном контейнере образцов грунта будет исследован через несколько лет, после отработки более совершенных методов анализа. 24 апреля космонавты стартовали с поверхности Луны. Взлетная ступень и небольшой запущенный спутник остались на лунной орбите; спутник работал 35 суток. На пути к Земле Маттингли вышел в открытый космос, совершив переход к двигательному отсеку, чтобы извлечь отснятую фотопленку. Работа в открытом космосе продолжалась около часа. 27 апреля после 11-дневного полета «Аполлон-16» приводнился в центральной части Тихого океана к югу от Гавайских островов.

Космический корабль «Аполлон-17», которым заканчивалась программа «Аполлон», стартовал к Луне 7 декабря 1972 г. На борту корабля были космонавты Ю. Сернан, геолог Х. Шмитт и Р. Эванс. При чем Сернан был членом экипажа «Джемини-9», совершил выход в открытый космос, на «Аполлоне-10» производил маневры лунного отсека вблизи поверхности Луны. Прилунение Сернана и Шмитта было произведено 11 декабря в ложнине Тавр к юго-западу от кратера Литтров, находящегося к юго-востоку от прибрежной зоны Моря Ясности. Район посадки (рис. 4) — долина между горами, имеющими высоту до 2,3 км. Сернан и Шмитт пробыли на поверхности Луны 75 часов, из них 22 часа — время непосредственной работы на ее поверхности, протяженность поездок на луноходе составила 36 км. Космонавты отобрали образцы общим весом 113 кг. Около небольшого кратера Шорти обнаружен реголит ржаво-оранжевого цвета. Участки на лунной поверхности, имеющие такую же окраску, замечены с селеноцентрической орбиты около кратера Сульциций Галл. После проведения ряда других научных исследований, космонавты осуществили взлет с Луны, и 19 декабря «Аполлон-17» вернулся на Землю.

Таким образом, в результате полетов автоматических станций «Луна-16» и «Луна-20», шести пилотируемых

космических кораблей «Аполлон» на Землю были доставлены лунные образцы из различных районов видимого полушария Луны. На Землю доставлено 387 кг лунного вещества, характеризующего как морские территории, так и материковые. Космонавты экспедиций «Аполлон» провели на поверхности Луны около 300 часов, из них 80 часов — общая продолжительность выхода космонавтов на лунную поверхность. Подробные исследования доставленного лунного вещества, проведенные многочисленными учеными в разных странах, впервые позволили получить непосредственное представление о составе, возрасте, развитии вещества лунной поверхности.

Глава 2

СРЕДА ЛУНЫ

УСЛОВИЯ ПРЕБЫВАНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ЛУНЕ

Разносторонние непосредственные исследования Луны и ее вещества дали возможность получить многие представления о ней, как среде пребывания человека.

Выяснение особенностей пребывания человека на Луне имеет существенное значение, поскольку на ее поверхности, лишенной атмосферы, в дальнейшем можно проводить особенно точные астрономические наблюдения, проводить в условиях сверхвысокого космического вакуума работы по получению особо чистых химических веществ, необходимых в ряде отраслей промышленности, и многие другие научные исследования. Наконец, в будущем Луну можно использовать как промежуточную станцию при пилотируемых межпланетных космических полетах.

Высадки на Луну и пребывание там космонавтов, снабженных автономной системой жизнеобеспечения, как известно, не вызвали у космонавтов особенно ощутимых физиологических изменений. Этот сложный и многосторонний вопрос, нуждающийся в специальном и подробном анализе, здесь не рассматривается. Некоторые кратковременные отклонения от нормы у космонавтов во время их пребывания на Луне были связаны с эмоциональными нагрузками и усталостью при больших исследовательских работах.

Физическая среда лунной поверхности, конечно, не благоприятна для пребывания на ней человека без автономной системы жизнеобеспечения, особенно из-за отсутствия атмосферы; человек же может существовать в атмосфере земного состава. При специальных измерениях, проведенных при полетах «Аполлона-14 и -15», на Луне найдена очень низкая концентрация газов — около $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, что даже меньше, чем концентрация неона, ожидаемая из

солнечного ветра. При полете «Аполлона-17», оборудованного чувствительным ультрафиолетовым спектрометром, атмосфера не найдена.

Вода на поверхности Луны также отсутствует. При детальном анализе образцов пород в них обнаружена H_2O при верхних концентрациях в сотни граммов на тонну лунного грунта. Она находится в очень рассеянном состоянии в нарушениях кристаллической структуры минералов и частично в составе газовых пузырьков. Основная часть этой H_2O образовалась при длительном взаимодействии частиц солнечного ветра с веществом поверхности Луны. Лишь в очень редких случаях встречены минеральные частицы, содержащие связанную воду, — амфибол, гетит. Длительное пребывание человека на поверхности Луны затрудняется также перепадами температур в дневное и ночное время с их большими абсолютными значениями и существенным фоном космического излучения.

СХОДСТВО И ОТЛИЧИЯ ЛУННЫХ И ЗЕМНЫХ ПОРОД

Петрография

Поверхность Луны покрыта слоем реголита (грунта) — вещества лунных пород, переработанного при взрывах и метеоритных ударах, в результате температурных перепадов, когда расшатывается кристаллическая структура минералов, и других факторов. Реголит — особенно рыхлый у поверхности. Толщина его слоя оценивается на различных участках посадок в 3—6 м. На морских территориях реголит темно-серый, на материковых участках — более светлый, что обусловлено различием пород, из которых реголит образовался. В реголите и на его поверхности распределены камни — изверженные породы, имеющие различные формы и размеры, и кусочки брекчий. В материковых участках обнажаются скальные породы. Автоматический аппарат «Луноход-2» при работе в районе кратера Лемонье в зоне, переходной между морскими и материковыми участками, прошел вдоль разлома, в котором на десятки метров обнажались коренные породы. Изверженные

породы, на которых находится реголит, представлены по результатам изучения образцов, доставленных из разных участков Луны, главным образом двумя типами — базальтами на морских территориях и анортозитами и габброидными анортозитами на материковых участках.

Базальты лунных морских территорий представляют собой вулканические кристаллические образования со средней плотностью $3,19 \text{ г/см}^3$. По размеру слагающих их минералов это — породы крупнозернистые (габброидные базальты) с размером зерен больше $0,15 \text{ мм}$ (рис. 5, а), среднезернистые и тонкозернистые (размер зерен меньше $0,05 \text{ мм}$). Они состоят главным образом из зерен пироксенов, полевых шпатов, оливина, ильменита и др. Рассеянные зерна ильменита в основном обуславливают темную окраску этих пород. В породах распространены микроскопические газовые пузырьки. Такие же зерна минералов находятся в составе морских брекчий, в которых обломки горных пород и стеклянные шарики распределены в тонкозернистом цементирующем веществе. Цвет цементирующего вещества изменяется от коричневого до черного. Поэтому брекчии более темные (рис. 5, б), чем кристаллические породы. В брекчиях видны следы воздействия динамического давления — ударного метаморфизма: микротрещины, пластинчатые образования, следы плавления и др.

Лунный реголит представляет собой рыхлое вещество с плотностью $0,87—1 \text{ г/см}^3$, состоящее из обломков кристаллических пород и брекчий остроугольной, иногда сглаженной формы, с примесью природных стекол неправильной или сферической формы (рис. 6). Стекла в реголите имеют различную окраску — коричневую, зеленую, желтую и т. д. (рис. 7). Они составляют до 50% реголита. Оранжевый цвет реголита, отобранного при посадке «Аполлона-17», объясняется большим содержанием в нем соответствующе окрашенных стекол. В стеклах видны газовые пузырьки. Большое распространение стекол в реголите, смешанный состав реголита, в котором, кроме того, найдены метеоритные частицы, показывают, что реголит мог образоваться как в результате дробления вещества при сильных метеоритных ударах, так и при вулканическом извержении и распылении вещества в вакууме на ранних стадиях развития Луны. Воздействием высоких температур, развивающихся при сильных метеоритных ударах,

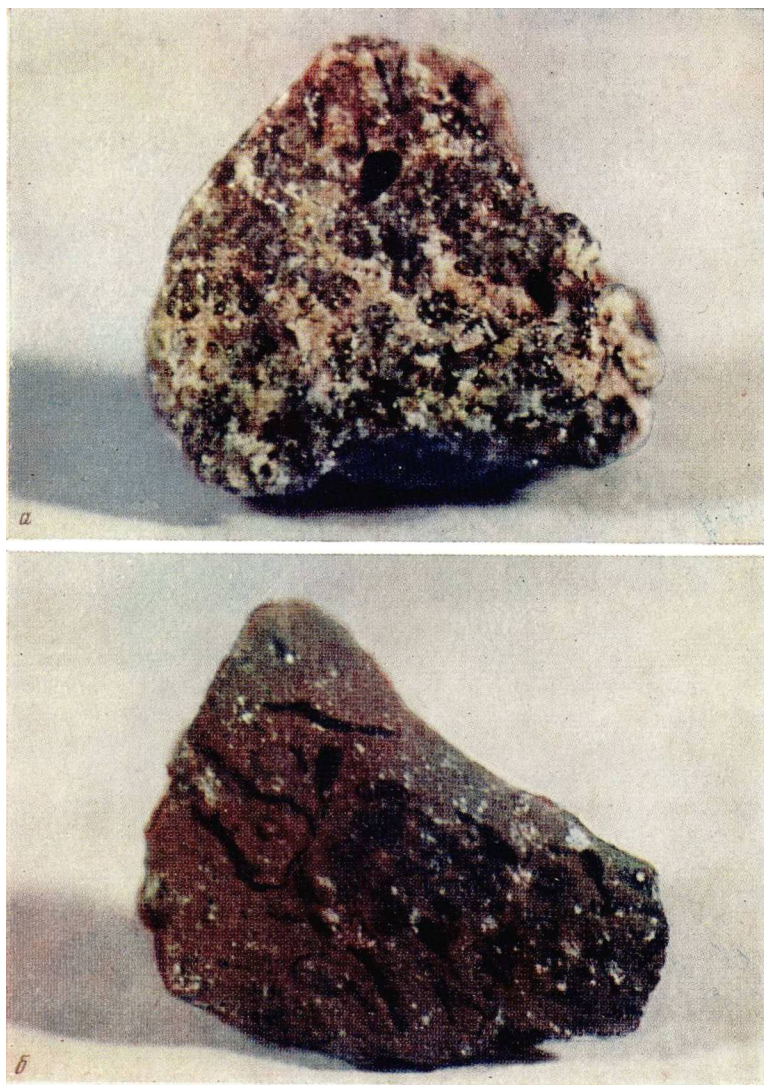


Рис. 5. Лунные образцы (размером 1 см) из Моря Спокойствия (фото К. В. Мура):

a — крупнозернистый базальт;
б — брекчия.



Рис. 6. Частицы лунного реголита из Моря Спокойствия (фото Дж. Вуда).

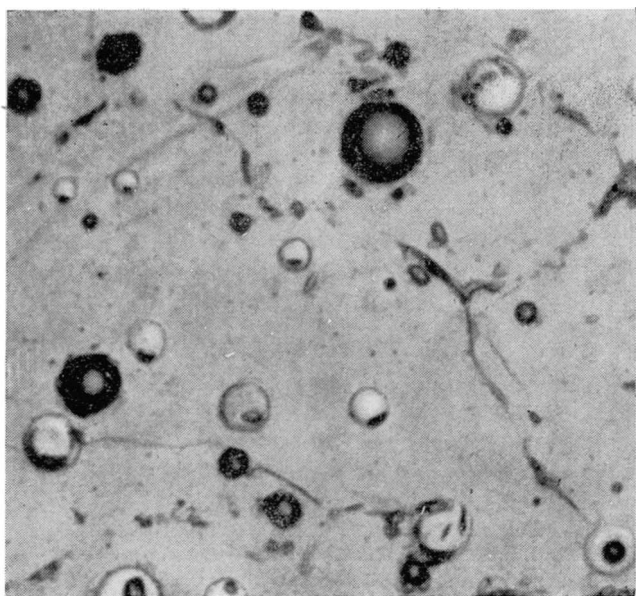


Рис. 7. Лунное стекло зеленоватого цвета из Океана Бурь (фото Дж. Вуда).

Размер поля 0,5 мм. Видны пузырьки.

объясняется также присутствие остеклованных участков и пленок стекла, которые были найдены на некоторых образцах лунных пород.

Анортозиты материковых зон Луны представляют собой светлоокрашенные породы, состоящие главным образом из плагиоклаза — анортита. Анортозитовые частицы встречены и в составе реголита морских территорий, куда они были вынесены, как предполагают, из материковых зон при метеоритных ударах. Реголит лунных материковых участков, как и морских, состоит из мелких остроугольных обломков пород (рис. 8) с примесью стекол и метеоритных частиц.

Петрографическая структура базальтов чаще офитовая, порфировая и т. д. Лунные базальты по своей структуре и минеральному составу сходны с земными базальтами океанических хребтов (толеитовыми базальтами), а также напоминают каменные метеориты — базальтовые ахондри-

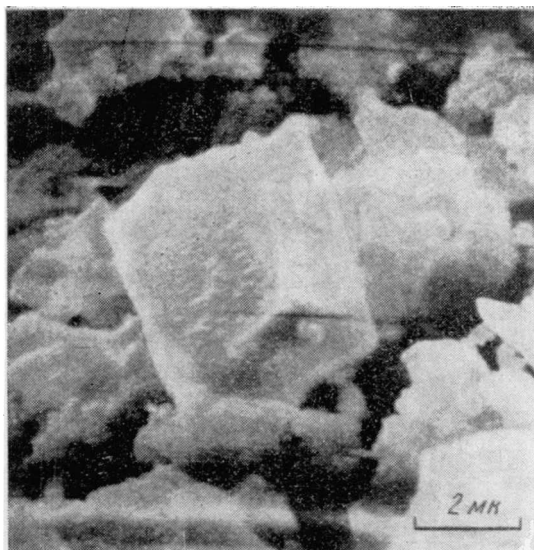


Рис. 8. Частицы материкового грунта, сфотографированные на растровом электронном микроскопе (по А. П. Виноградову, 1972). Грунт доставлен «Луной-20».

ты. Структура анортозитов часто полнокристаллическая. Иногда в частицах анортозита видны следы воздействия сильных динамических давлений. Лунные анортозиты сходны с земными анортозитами, найденными на геологически древних щитах — Балтийском, Украинском, Алданском, Канадском и др. Как базальты, так и анортозиты имеют общие петрографические сходства в различных районах Луны. Тем не менее некоторые отличия в разных районах наблюдаются, они обусловлены различным соотношением слагающих минералов, структурой, подчас обусловленной разной степенью перекристаллизации и разной степенью изменения при воздействии динамических давлений. В ряде случаев найдена очень интересная криповая компонента (название — производное от KREEP) — порода, обогащенная калием, редкоземельными элементами, фосфором, ураном и торием.

Минеральный состав

Изверженные породы, брекчии и реголит Луны состоят главным образом из пироксенов, полевых шпатов (плаггиоклаза), оливина, ильменита в различных соотношениях (табл. 2 и 3). Ильменита особенно много в образцах, доставленных «Аполлоном-11». Анортозиты и троктолитовые анортозиты состоят в основном из плаггиоклаза, пироксена. Например, содержание плаггиоклаза в материковом образце, доставленном «Луной-20», составляет 45—70 весовых %.

В меньшем количестве в образцах найдены акцессорные минералы, также известные и в земных породах, — это калиевый полевой шпат; различные шпинели, включая ульвошпинель Fe_2TiO_4 (в сростках с ильменитом), пикотит (хромульвошпинель), шпинель MgAl_2O_4 , хромит FeCr_2O_4 , титановый хромит (рис. 9); рутил TiO_2 ; поли-

Таблица 2

Минеральный состав (молекулярные %) и плотность лунных пород, доставленных с трех морских территорий (по А. Л. Туркевичу, 1971)

Минералы	Станции		
	«Луна-16»	«Аполлон-11»	«Аполлон-12»
Пироксены	42,3	63,1	43,6
энстатит MgSiO_3	13,2	12,9	8,3
волластонит CaSiO_3	15,5	30,6	20,3
ферросилит FeSiO_3	13,6	19,6	15,0
Полевые шпаты	28,4	22,2	24,9
альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	2,9	2,2	2,3
анортит $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	25,5	20,0	22,6
Оливин	21,8	—	24,8
форстерит Mg_2SiO_4	11,6	—	15,4
фаялит Fe_2SiO_4	10,2	—	9,4
Ильменит FeTiO_3	7,6	14,7	6,8
Плотность, г/см ³	3,22	3,27	3,17

Таблица 3

Соотношение железосодержащих фаз в некоторых лунных образцах, исследованных методом эффекта Мессебауэра (в %)

Минералы	Реголит, «Луна-16» (по А. П. Виноградову, 1972)	Базальт 12063, «Аполлон-12» (по Герценбергу, 1972)	Реголит, «Луна-20» (по А. П. Виноградову, 1972)
Пироксен FeSiO_3	45,5	57,2	40
Плагиоклаз	~50	27,5	~50
Оливин Fe_2SiO_4	3,4	8,8	7,8
Ильменит FeTiO_3	1	6,2	<0,05
Ульвошинель Fe_2TiO_4	≤0,06	—	0,9
Металлическое железо	0,33	0,13	1,1
Троилит FeS	<1	0,18	—

морфные модификации SiO_2 — кристобалит, тридимит, кварц, составляющие в базальтах до 5%; бадделейт ZrO_2 ; маккинавит (в образцах, доставленных «Аполлоном-14»); самородная медь; халькопирит; циркелит; перовскит CaTiO_3 ; витлокит $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и фторапатит; циркон ZrSiO_4 . Следовательно, лунные образцы содержат большое разнообразие минералов, обогащенных тугоплавкими элементами — хромом, титаном, цирконием.

В лунных образцах реголита, брекчий и пород найдены самородное железо и никелистое железо, троилит FeS , когенит Fe_3C , шрейберзит Fe_3P . Эти типично метеоритные минералы могли быть привнесены в лунный реголит в составе метеоритов, а в породах могли образоваться при их кристаллизации.

Частицы водосодержащих минералов встречены в очень редких случаях. Это — водные силикаты в образце 10017*, аналог амфибола в образце 10058 и частицы гетита FeOOH в образце, доставленном «Аполлоном-16». Из углеродсодержащих частиц описаны, кроме когенита, редкие зерна арагонита и графита.

* Номера доставленных на Землю лунных образцов содержат среди первых двух цифр — одну или обе цифры порядкового номера космической станции, три последующие цифры означают порядковый номер данного образца, после точки в номере — следует порядковый номер кусочка данного образца или фракции.

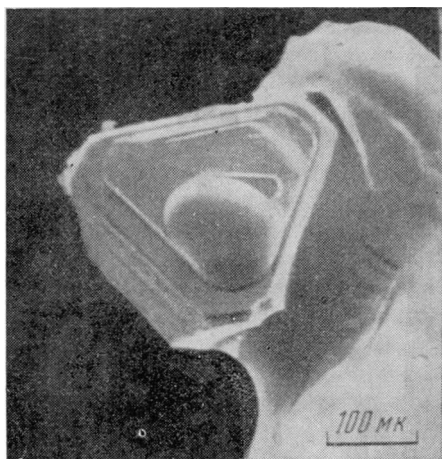


Рис. 9. Электронно-микроскопическая фотография кристалла титанового хромита с каплевидным оливином (по Ж. Жедвабу).

Образец 12036.2, доставленный «Аполлоном-12».

В первых же доставленных на Землю лунных породах были обнаружены новые минералы, не известные раньше ни в земных породах, ни в метеоритах: железо-титановый окисел армолколит $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Ti}_2\text{O}_5$ (назван в честь трех космонавтов «Аполлона-11» — Н. Армстронга, Э. Олдрина, М. Коллинза), он присутствует и в морских породах («Аполлон-11») и в материковых («Луна-20»); железо-кальциевый силикат пироксерферроит $(\text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mg}, \text{Mn})\text{SiO}_3$, структурно сходный с земным минералом пироксмангитом; транквиллит $\text{Fe}_8(\text{Zr}, \text{Y})_2\text{Ti}_3\text{Si}_3\text{O}_{24}$ (название происходит от латинского названия Моря Спокойствия), он найден в базальтах, доставленных «Аполлоном-11, -12, -14». Кроме того, в образцах, доставленных «Аполлоном-11», обнаружен новый титан-циркониевый окисел; по химическому составу он близок к армолкоlitу, но содержит 4,4% ZrO_2 , 3,1% CaO и отличается по физическим свойствам.

Особенности минерального состава лунных пород показывают, что породы кристаллизовались в условиях малой летучести кислорода при отсутствии воды, в результате чего отсутствуют соединения с трехвалентным железом и вода.

Химический состав

Породы лунных морей и материков, представленные соответственно — базальтами и анортозитами, заметно отличаются и по химическому составу (табл. 4). В породах морских территорий больше железа, хрома, титана, меньше алюминия (исключение составляют базальты из Фра-Мауро), кальция, марганца. Из химических элементов-примесей в морских образцах больше скандия, циркония, ниобия, редкоземельных элементов, гафния (табл. 5), т. е. образцы из морских территорий содержат больше тугоплавких элементов, особенно Cr, Ti, Zr, Nb, Hf, чем материковые образцы. Вообще повышенным содержанием этих элементов лунные породы отличаются и от земных пород и от метеоритов. Особенно были обогащены Ti, Zr и Hf первые лунные образцы, доставленные из Моря Спокойствия; содержание TiO_2 в базальтах достигало 11,5%. В образцах, доставленных из других районов Луны, содержание этого компонента было меньше; в материковом анортозите, доставленном «Аполлоном-16», TiO_2 составляет 0,3%. Одна из существенных особенностей химического состава лунных образцов, характеризующая, в частности, условия фракционирования редкоземельных элементов, — пониженное содержание редкоземельного европия (так называемый европиевый минимум). Если исключить из химического анализа лунных базальтов высокое содержание TiO_2 ильменита, то отличия химического состава лунных базальтов, земных базальтов океанических хребтов и каменных метеоритов — базальтовых ахондритов значительно сглаживаются.

В реголите, по сравнению с коренными породами, подчас уменьшается содержание железа, марганца, но увеличивается содержание алюминия, кальция. Содержание никеля и ряда относительно легколетучих элементов увеличивается. Примечательно, что мало изменяется содержание титана, т. е. реголит образовался в основном из подстилающих коренных пород.

Интересно сравнить содержание элементов-примесей в лунном веществе и в метеоритах, поскольку предполагается, что Луна первоначально образовалась, возможно, из вещества, сходного с каменными метеоритами — хондритами. В табл. 5 приведены для примера данные для реголита, доставленного «Луной-16» (морской реголит) и «Луной-20» (материковый реголит), сравнительно с

Таблица 4

Химический состав лунных образцов

Район	Станция	Образцы и №	SiO ₂	MgO	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	Литература
<i>Морские территории</i>														
Море Изобилия	«Луна-16»	базальт (среднее)	43,8	7,05	19,35	13,65	10,4	0,38	0,15	0,14	0,28	0,20	4,9	А. П. Виноградов, 1971
		базальт, Г-38-2	43,36	4,97	17,48	15,13	12,77	0,70	0,17	—	0,23	0,27	4,37	Грайв, 1972
		реголит (среднее)	41,7	8,78	16,64	15,33	12,49	0,34	0,10	0,12	0,28	0,21	3,39	А. П. Виноградов, 1971
		реголит, Л-16-19	—	9,28	15,8	15,3	11,5	0,34	0,20	—	—	—	3,60	Д. Жером, 1972
Море Спокойствия	«Аполлон-11»	брекчия	43,0	7,6	19,4	12,5	11,1	0,49	0,13	0,07	0,25	0,32	4,8	К. Кейль, 1972
		стекла	43,8	8,7	17,3	13,5	11,8	0,32	0,09	0,07	0,31	0,27	3,2	*
		базальт, 10057	39,79	7,65	19,35	10,84	10,08	0,54	0,32	0,17	0,24	0,20	11,44	А. Э. Энгель, 1971
		реголит (среднее)	42,04	7,90	15,74	13,92	12,01	0,44	0,14	0,12	0,30	0,21	7,48	Х. Д. Розе, 1973
Океан Бурь	«Аполлон-12»	реголит, 10084	43,2	8,0	15,6	13,8	11,9	0,45	0,13	—	0,26	0,21	7,5	Д. Э. Гиллум, 1972
		брекчия (среднее)	42	9	17,6	11,7	10,4	0,40	0,16	—	0,43	0,39	9	Х. П. Тейлор, 1970
		базальт, 12022.56	43,20	10,43	21,44	9,04	9,56	0,47	0,07	0,13	0,38	0,25	5,16	А. Э. Энгель, 1971

Таблица 4 (продолжение)

Район	Станция	Образцы и №	SiO ₂	MgO	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	Литература
Океан Бурь	«Апол- лон-12»	реголит (среднее)	46,40	9,73	15,50	13,50	10,50	0,59	0,32	0,40	0,40	0,21	2,66	Х. Д. Розе, 1973
		реголит 12033.59	47,2	9,28	14,2	14,3	10,6	0,66	0,41	0,52	0,32	0,19	2,47	Ф. Кутлига, 1971
		брекчия, 12034.18	45,8	9,6	13,3	15,7	11,2	0,79	—	—	0,27	0,17	2,7	Х. Вахита, 1971
		базальт, 14310	47,19	7,87	8,38	20,14	12,29	0,63	0,49	0,34	0,18	0,11	1,24	LSPET, 1971
Фра- Мауро	«Апол- лон-14»	реголит (среднее)	47,93	9,24	10,37	17,60	11,19	0,68	0,55	0,53	0,25	0,14	1,74	Х. Д. Розе, 1973
		реголит, 14259.59	46,94	9,55	10,60	17,31	11,06	0,60	0,48	0,46	0,20	0,14	1,75	Д. П. Виллис, 1972
		реголит, 14421.24	48,4	9,41	10,54	17,52	10,49	0,68	0,52	0,48	0,19	0,14	1,70	Д. А. Филпоттс, 1972
		базальт, 15499	47,62	8,94	20,26	9,27	10,40	0,29	0,06	0,08	—	0,28	1,81	LSPET, 1972
Хэдли	«Апол- лон-15»	реголит (среднее)	46,61	10,46	11,62	17,18	11,64	0,46	0,20	0,19	0,25	0,16	1,36	Х. Д. Розе, 1973
		реголит, 15006.22 (40 см)	46,3	10,99	14,96	13,96	10,31	0,48	0,22	0,25	0,34	0,19	1,73	Д. Ф. Нава, 1973
		реголит, 15001.26 (240 см)	48,2	11,36	14,02	13,17	10,42	0,57	0,30	0,32	0,34	0,19	1,71	*

Таблица 4 (окончание)

Район	Станция	Образцы и №	SiO ₂	MgO	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	Литература
Материковые территории														
Материк между Морем Изобил- ия и Морем Кризисов	«Луна- 20»	анортосит	44,2	13,37	6,91	19,1	13,3	0,48	0,47	0,17	0,18	0,12	0,52	А. П. Виноградо в 1972
		реголит, 4-1	44,4	9,70	7,03	22,9	15,2	0,55	0,10	0,14	0,10	0,12	0,56	То же
		реголит, 2-1	45,8	9,85	7,02	21,6	14,9	0,46	0,10	0,17	0,10	0,13	0,53	*
		реголит, 22001.4	45,4	9,19	7,37	23,44	13,38	0,29	0,07	0,06	0,14	0,10	0,47	Д. Ф. Нава, 1973
		реголит, 22001.9	—	10	8,1	22,8	14,2	0,33	0,08	—	0,18	0,10	0,49	Д. К. Лаул, 1973
Материк между Морем Нектара и Морем Облаков	«Апол- лон-16»	анортосит	45,30	4,35	4,12	28,70	16,24	0,50	0,09	0,06	0,14	0,05	0,29	Х. Д. Розе, 1973
		анортосит, 66095.37	44,07	4,72	3,03	30,02	16,65	0,35	0,08	0,06	—	0,05	0,18	Б. М. Бансел, 1973
		реголит (среднее)	45,12	5,86	5,46	26,72	15,41	0,51	0,13	0,13	0,11	0,07	0,57	Х. Д. Розе, 1973
		реголит, 60007.114	45,2	4,43	3,60	29,08	16,35	0,42	0,08	0,08	0,05	0,02	0,39	Д. Ф. Нава, 1973
		реголит, 64421.22	44,68	5,33	4,90	27,63	15,69	0,47	0,11	0,11	—	0,08	0,55	Б. М. Бансел, 1973
Земные базальты (среднее)		49,3	6,6	10,54	16,0	9,9	2,8	1,0	0,32	0,025	0,17	2,0	В. Мэнсон, 1967	
Каменные метеориты — базаль- товые ахондриты (среднее)		49,00	9,73	18,04	11,95	9,08	0,40	0,05	0,11	0,48	0,52	0,61	По подсчету Г. И. Вдовкина, 1973	

Таблица 5

Содержание элементов-примесей * в образцах реголита, доставленных «Луной-16» и «Луной-20» и в каменных метеоритах — обыкновенных хондритах (10⁻⁴%)

Атомный №	Химические элементы	Реголит, «Луна-16»	Реголит, «Луна-20»	Метеориты
3	Li	6,6	6,2	1,7
4	Be	2,5	—	0,038
5	B	4,4	39	2
9	F	131	37	125
17	Cl	19,7	14	88
21	Sc	55	15,8	7,6
23	V	79	45	63
27	Co	35	28	650
28	Ni	180	260	14000
29	Cu	37	11	90
30	Zn	33,4	21,5	55
31	Ga	4,5	2,3	5
32	Ge	2,25	0,43	10
33	As	0,41	0,25	2
34	Se	0,36	0,21	8
35	Br	0,1	0,14	0,24
37	Rb	1,9	2	5
38	Sr	253	250	10
39	Y	70,4	43	2
40	Zr	282	230	10
41	Nb	15,9	6,8	0,3
42	Mo	7	26	1,5
44	Ru	<0,1	~0,6	1
45	Rh	<0,15	—	0,26
46	Pd	<0,38	—	1
47	Ag	<0,28	—	0,09
48	Cd	0,52	1,74	0,05
49	In	0,07	0,0039	0,004
50	Sn	1,7	3	0,7
51	Sb	0,85	<0,2	0,1
52	Te	0,027	0,0215	1
53	J	0,0072	0,012	0,035

* Содержание элементов в образцах реголита приведено по данным А. П. Виноградова, а также Д. К. Лаула, Д. В. Моргана, П. А. Хелмке, Д. Жерома; в метеоритах — по подсчету Г. П. Вдовыкина.

Таблица 5 (окончание)

Атомный №	Химические элементы	Реголит, «Луна-16»	Реголит, «Луна-20»	Метеориты
55	Cs	0,09	0,05	1
56	Ba	170	110	3,5
57	La	12	7	0,3
58	Ce	35	17,5	0,84
59	Pr	8,6	3,4	0,12
60	Nd	24	11,2	0,58
62	Sm	9	3,48	0,21
63	Eu	2,3	0,99	0,074
64	Gd	10	5	0,32
65	Tb	1,5	0,72	0,049
66	Dy	12,5	5,5	0,31
67	Ho	2,8	1,2	0,073
68	Er	5,8	3,5	0,21
69	Tm	0,78	0,35	0,033
70	Yb	6,5	2,8	0,17
71	Lu	0,97	0,42	0,031
72	Hf	5,9	2,7	0,19
73	Ta	—	0,3	0,02
74	W	24	82	0,13
75	Re	—	0,005	0,055
76	Os	0,03	—	0,65
77	Ir	0,001	0,0095	0,65
78	Pt	0,05	—	1
79	Au	0,0025	0,0036	0,2
80	Hg	0,14	—	0,13
81	Tl	—	0,0066	0,003
83	Pb	0,9	1,4	0,3
88	Bi	—	0,0026	0,016
90	Th	1,2	1,5	0,04
92	U	0,38	0,44	0,01

обыкновенными хондритами. Из табл. 5 можно видеть, что реголит по сравнению с метеоритами значительно обогащен Sr, Y, Zr, Ba, а также Sc, Nb, Mo, Cd, редкоземельными элементами, Hf, Ta, W, Th, U, т. е. в основном тугоплавкими элементами, и обеднен относительно

легколетучими элементами — Cl, Cu, Zn, Ge, As, Se, Te, J, Cs, Bi и типично метеоритными элементами — Co, Ni, Re, Os, Jr, Pt, Au. Это может показывать на то, что первоначальная конденсация лунного вещества и его дифференциация происходили при высокотемпературных условиях. При этом должны были в значительной степени потеряться легколетучие органогенные элементы.

Радиоактивные элементы

Содержание естественных радиоактивных элементов (урана, тория и калия-40) имеет существенное значение не только для характеристики лунной среды, но особенно для выяснения возраста кристаллизации ее вещества. Эти элементы многократно исследовались в лунном веществе (табл. 6). Количество тория определено в $(0,31—14,2) \cdot 10^{-4}\%$, урана $(0,07—4,4) \cdot 10^{-4}\%$; в образце 12013, доставленном «Аполлоном-12», тория найдено $34,3 \cdot 10^{-4}\%$, урана $10,7 \cdot 10^{-4}\%$. Величины отношения Th/U в лунных образцах 3,4—4,5. В породах морских территорий радиоактивных элементов содержится подчас больше, чем в материковых районах. Содержание этих элементов в веществе Луны сравнимо с их концентрацией в земных породах и базальтовых ахондритах и выше, чем в обыкновенных хондритах (см. табл. 5). Для земных изверженных пород величины отношения Th/U составляют 2,7—6.

Уран и торий в лунных образцах концентрируются в цирконсодержащих фазах — в транквиллитите, бадделеите ZrO_2 , относящемся к группе уранинита, циркелите $(Ca, Fe, Th, U)_2 \cdot (Ti, Zr)_2O_5$ и в фосфатах — витлоките и апатите. Особенно обогащена ураном и торием криповая компонента.

Возраст Луны

Луна образовалась одновременно с веществом Земли и метеоритов. Определения радиогенного возраста ее пород (т. е. возраста кристаллизации пород и составляющих их минералов), многократно сделанные радиометрическими методами по соотношению уран — свинец, рубидий — стронций и калий — аргон, показали значительные величины (табл. 7).

Таблица 6

Содержание тория и урана в лунных образцах (10⁻⁴%)

Станция	Образец	Th	U	Th/U
«Луна-16»	реголит	1,2	0,25—0,38	3,8
«Луна-20»	реголит	0,95—1,5	0,07—0,5	3,4
«Аполлон-11»	порода	0,76—3,05	0,28—0,8	3,8
	реголит	2,1	0,19—0,54	3,9
«Аполлон-14»	порода	10,9—14,2	2,9—4,1	—
	реголит 14163	2,7—13,6	0,69—4,4	—
«Аполлон-15»	реголит 15041	4,6	1,6	—
«Аполлон-16»	реголит	1,06—2,45	0,28—0,63	3,5—4
	брекчия 65015	10,4	2,34	4,5
«Аполлон-17»	порода	0,31—5,6	0,11—1,4	—
	реголит	1,08—1,39	0,28—0,38	—

Таблица 7

Возраст кристаллизации лунных образцов (млрд. лет)

Станция	Образцы	Методы определения возраста		
		U — Th — Pb	Rb — Sr	K — Ar
«Луна-16»	базальт	—	3,42	3,45
	реголит	—	4,25—4,85	—
«Луна-20»	анортозит	4,12—4,42	—	3,9
«Аполлон-11»	базальт	3,4—3,8	3,8	2,3—3,7
	реголит	4,6—4,76	4,42	—
«Аполлон-12»	базальт	2,8—3,6	—	—
	реголит	4,5	—	—
	брекчии	4,22	—	—
«Аполлон-14»	породы	3,8—3,96	3,93	2,4—4,2
«Аполлон-15»	»	3,36—4,01	—	3,25—3,9
	»	3,96—4	—	—

Породы морских зон Луны более молодые, чем материковые. Так, абсолютный возраст образцов базальта, отобранного в различных морских участках, составляет (в млрд. лет) 3,4 (Море Изобилия), 3,4—3,8 (Море Спокойствия), 2,8—3,6 (Океан Бурь), 3,8—3,9 (Фра Мауро). Возраст пород, определенный по соотношению изотопов свинца Pb^{207}/Pb^{206} в цирконе и фосфате, для района Хэдли имеет величины 3,36, 3,46, 3,75 и 4,01 млрд. лет. Величины калий-аргонового датирования дают больший разброс данных — вероятно, из-за потери радиогенного аргона в процессе метаморфизма. Например, для базальтов из Моря Спокойствия эти величины составляют 2,3—3,7 млрд. лет, для пород из района Фра Мауро — 2,4—4,2 млрд. лет и т. д.

Анортозиты материкового участка Луны из реголита, доставленного «Луной-20», имеют возраст до 4,42 млрд. лет. Возраст образцов пород из района кратера Декарт, доставленных «Аполлоном-16», составляет 3,96—4 млрд. лет, а возраст пород, доставленных «Аполлоном-17», — до 4,65 млрд. лет.

Неожиданно оказалось, что реголит не только на материковых, но также и на морских участках очень древний — древнее, чем подстилающие его базальты на морских территориях. Например, в Море Изобилия («Луна-16») возраст базальтов, по данным рубидий-стронциевого датирования, 3,42 млрд. лет, а возраст реголита 4,25—4,85 млрд. лет.

Кроме радиогенного возраста, для лунных образцов с различных территорий многократно определен космогенный возраст, т. е. возраст облучения вещества космическими лучами. Он вычисляется по содержанию в образцах космогенных радиоактивных и стабильных (редких газов) изотопов. Результаты показали, что реголит и образцы пород, находящиеся на поверхности Луны, облучались космическими лучами в течение сотен миллионов лет. Например, реголит, доставленный «Луной-16», имеет космогенный возраст 475—840 млн. лет, анортозит, доставленный «Луной-20», — от 210 до 500 млн. лет. Космогенный возраст реголита из Моря Спокойствия также составляет сотни миллионов лет, возраст базальта из кратера Сервейор Океана Бурь 180 млн. лет, возраст пород из Фра Мауро 440 млн. лет, космогенный возраст пород Моря Дождей (район Хэдли) — до 500 млн. лет.

Таким образом, возраст Луны, определенный по ее наиболее древним образцам, составляет 4,4—4,6 млрд. лет. Это период ранней дифференциации Луны, когда образовалась лунная кора, сложенная древними анортозитовыми породами. В земных условиях таких древних пород не сохранилось. Сходные величины абсолютного возраста имеют метеориты. Этот возраст принимается за возраст солнечной системы и Земли. Возраст лунных базальтов морских территорий примерно 3,6 млрд. лет. Это время образования лунных морей. Примерно такой же возраст имеют и наиболее древние породы Земли. Возраст лунного реголита и брекчий древнее, чем возраст подстилающих морских базальтов. Возможно, это связано с тем, что компоненты реголита образовались не только в результате разрушения подстилающих базальтовых пород, но также в результате привноса компонентов древних материковых зон при выбросах в процессе метеоритных ударов, а также в результате привноса древнего метеоритного вещества.

МЕТЕОРИТНАЯ БОМБАРДИРОВКА

Большое число кратеров на лунной поверхности, имеющих валы (причем более молодые кратеры иногда накладываются на более древние), присутствие в лунных образцах различных признаков сильного динамического воздействия, присутствие тонко измельченного реголита — все это показывает, что Луна после своего образования испытывала метеоритную бомбардировку. На Земле выпадение метеоритов происходит довольно редко, поскольку мелкие метеорные тела, не долетая до поверхности, сгорают в атмосфере. Из-за отсутствия атмосферы Луна подвергается более интенсивной метеоритной бомбардировке. Падение крупных метеоритных тел аналогично эффекту взрыва. Взаимодействие ударных и отраженных волн вызывает разрушение пород, метеоритного вещества и образование кратера. Размеры кратера и расстояние, на которое выбрасывается вещество разрушенных пород, в шесть раз превышают аналогичные величины в земных условиях при равной затраченной работе, поскольку ускорение силы тяжести на Луне в шесть раз меньше земного.

Падение крупного метеорита на Луну в районе кратера Фра Мауро было зарегистрировано 13 мая 1972 г.

с помощью установленных на Луне сейсмометров. Размер метеорита, по оценке, был около 2 м, освободившаяся энергия была эквивалентна энергии взрыва 200 т тринитротолуола. Вызванные падением метеорита сейсмические колебания распространились на глубину 1000 км. Интерпретация сейсмических данных, кстати, показала, что в районе Фра Мауро лунная кора имеет толщину 60 км, под корой до глубины 960 км находится мантия, а ниже — ядро. Сейсмометр «Аполлона-12» за полтора года отметил 18 падений метеоритов.

Высокие температуры, развивающиеся при взрыве во время падения метеорита, вызывают изменение сохранившихся частиц метеоритного вещества. Силикатные фазы расплавляются с образованием стекла. Стеклообразного вещества особенно много в реголите и в матрице лунных брекчий. Частицы металла испытывают перекристаллизацию. В результате подчас трудно отличить метеоритное вещество от измененного при взрыве самого лунного вещества.

Привнос метеоритного вещества, кроме прямых поисков метеоритных частиц в лунном реголите и брекчиях, можно попытаться оценить по содержанию характерных для метеоритов химических элементов — никеля, кобальта, меди и др. Содержание этих элементов в образцах реголита в разных участках Луны приведено в табл. 8. В образцах лунных пород их количество меньше. Легко можно видеть, что часть реголита состоит из метеоритного вещества. В этом случае, кстати, становится понятным и несоответствие в величинах абсолютного возраста реголита и пород морских территорий. Породы материковых зон, как было видно выше, сформировались на 1 млрд. лет раньше морских. Они дольше подвергались метеоритной бомбардировке. Возможно, поэтому реголит материковых зон содержит несколько больше никеля, чем реголит морских территорий.

Известны различные типы метеоритов — железные, железокаменные, каменные. Из каменных метеоритов особенно интересны углистые хондриты. По сравнению с другими метеоритами они обогащены органическими соединениями и целым рядом элементов-примесей (Sb, Ge, Bi и др.). Определив распространенность этих элементов в лунных образцах, Э. Андерс с соавторами подсчитал, что в лунном реголите распределено 1—2% вещества, эквивалентного углистым хондритам.

Таблица 8

Содержание никеля, кобальта и меди в лунных образцах (10⁻⁴%)

Станция	Образец	Ni	Co	Cu
«Луна-16»	реголит	132—190	27—68	10,5—37
	базальт	79	22	19
«Луна-20»	реголит	260	27—34	11
	анортосит	189	27	7
«Аполлон-11»	реголит 10084	150	28	7,9
«Аполлон-12»	реголит	20—200	29—67	5
«Аполлон-14»	реголит 14163	34—990	4—77	10,4—13,4
«Аполлон-15»	реголит 15211	240	40—42	—
«Аполлон-16»	реголит	145—420	9,8—39	5—8,5
	брекчия 65015	260	25	6,5

Частицы метеоритного вещества, размерами в несколько миллиметров, обнаружены в образцах реголита со всех мест посадок на Луну, и в образцах, доставленных «Луной-16», «Луной-20», и в образцах, доставленных экспедициями «Аполлона».

Наиболее надежно можно отождествлять метеоритные частицы никелистого железа из-за их специфичного состава и структуры. Поэтому такие частицы особенно подробно были изучены. Форма частиц неправильная. На поверхности они иногда имеют маленькие углубления (рис. 10, а), образовавшиеся при ударе еще меньших частичек. Их структура часто дендритовая (рис. 10, б), свидетельствующая о воздействии высоких температур. Такую же структуру имеет тонкодисперсное метеоритное вещество из районов земных метеоритных кратеров взрывного типа. Минеральный состав таких лунных металлических частиц — типично метеоритный. Они состоят преимущественно из камасита при содержании никеля более 5% (табл. 9). Содержание элементов-примесей (Cu, Ir, Au и др.) в частицах никелистого железа сходно с их содержанием в частицах железа метеоритов. Распределение Ni и Co имеет картину (рис. 11), напоминающую распределение Ni и Co в метеоритном никелистом железе.

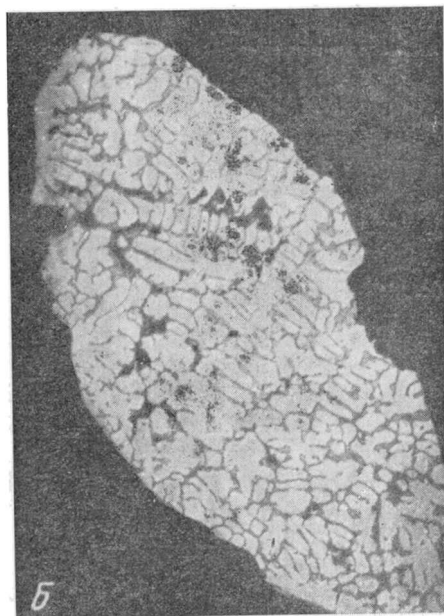
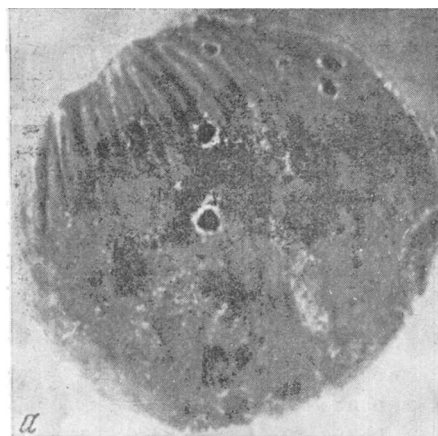


Рис. 10. Частица никелистого железа в образце 10085, доставленном «Аполлоном-11» (по Б. Мэйсону):

а — общий вид частицы, ее размеры $3,5 \times 3,2 \times 2,3$ мм, вес 88 мг; на поверхности видны углубления (кратерочки) и корочки силикатного стекла;

б — полированный срез частицы; видны дендритовые кристаллы камасита (белые) и троилит (серый).

Таблица 9

Химический состав зерен никелистого железа из лунных образцов и каменных метеоритов

Район и станция	Образец и фракция	Fe	Ni	Co	Cu	Ir	Au	Автор
		в %						
		n·10 ⁻⁴ %						
Море Спокойствия, «Аполлон-11»	реголит камасит	91,7	5,8	—	—	—	—	Д. А. Вуд, 1970
	тэнит	88,7	14,1	—	—	—	—	»
	реголит, 10084	94,6	4,7	0,52	340	2,6	0,83	Х. Ванке, 1970
	реголит, 10084.18	—	6,20	0,45	—	2,3	1,68	Х. Ванке, 1971
	то же	—	5,22	0,63	—	2,0	1,01	»
Океан Бурь, «Аполлон-12»	брекчия	94,1	5,8	0,49	—	—	—	Д. А. Вуд, 1970
	реголит	—	5,3	0,45	—	—	—	Д. И. Голдштейн, 1971
	реголит, 12001.114	—	7,62	0,59	225	7,3	1,27	Х. Ванке, 1971
	>150 мк	—	4,29	0,77	363	1,86	0,55	»
	35—150 мк	—	4,10	0,90	751	2,76	0,45	»
Фра Мауро, «Аполлон-14» Хэдли, «Аполлон-15» Декарт, «Аполлон-16»	>35 мк	—	5,74	0,55	134	1,3	0,2	Ф. Влоцка, 1972
	реголит, 14163	—	4,85	1,035	863	—	0,35	Ф. Влоцка, 1972
	реголит, 15601	—	6,1	0,36	220	1,64	1,30	Ф. Влоцка, 1973
	реголит, 60601	93,6	6,0	0,40	340	1,45	1,20	»
	то же	93,2	6,0	0,40	—	—	—	»
	реголит	—	5,4	0,6	—	—	—	Р. К. Гулей 1973
	камасит	—	16,8	1,0	—	—	—	»
Метеорит — эвкрит Метеорит — хондрит	Ювинас	96,5	2,9	0,62	150	0,9	0,76	Х. Ванке, 1970
	Пулгуск	90,3	9,1	0,46	433	4,25	1,18	»

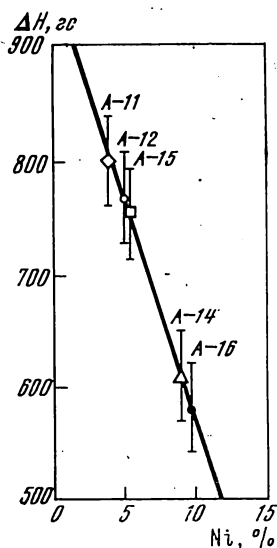
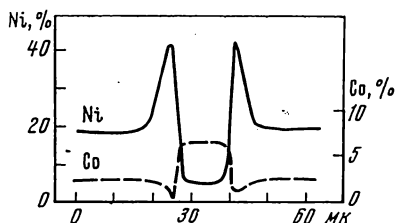


Рис. 11. Распределение Ni и Co в α - и γ -фазах железа в частице из реголита 14003, по данным рентгеноспектрального микроанализа (по Дж. Голдштейну).

Рис. 12. Корреляция ширины линий электронного парамагнитного резонанса (ΔH , в гауссах) и среднего содержания Ni в фазах металлического железа лунного реголита (по Ф. Тсайю).



Кроме типично метеоритных частиц, в лунном веществе присутствуют зерна металла, содержащие обычно меньше 0,5% никеля. Они отмечены в образцах изверженных пород и в реголите. Например, включение металла в кристаллической породе 14321, доставленной «Аполлоном-14», по данным Ф. Влоцка, содержит Ni 0,43%, Co 0,18%, Si $220 \cdot 10^{-4}\%$, Ir $2 \cdot 10^{-4}\%$, Au $1,1 \cdot 10^{-4}\%$. Ф. Тсай исследовал ферромагнитные частицы методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в образцах реголита, доставленных экспедициями «Аполлона». Изучение проводилось в области температур 4—300° К. Спектры были обусловлены присутствием металлических частиц железа, имеющих в основном сферическую форму и размеры от 30 Å до 1 мк. Ширина линий ЭПР коррелировалась с содержанием Ni в ферромагнитных частицах (рис. 12). Это показывало, что в реголите присутствуют частицы и элементарного железа и α -фазы метеоритного железа.

В реголите, доставленном «Аполлоном-11», Дж. Вуд нашел осколок железокосмического метеорита. Осколок состоит на 70% из никелистого железа и 30% силикатов (рис. 13). Фаза никелистого железа представлена кама-

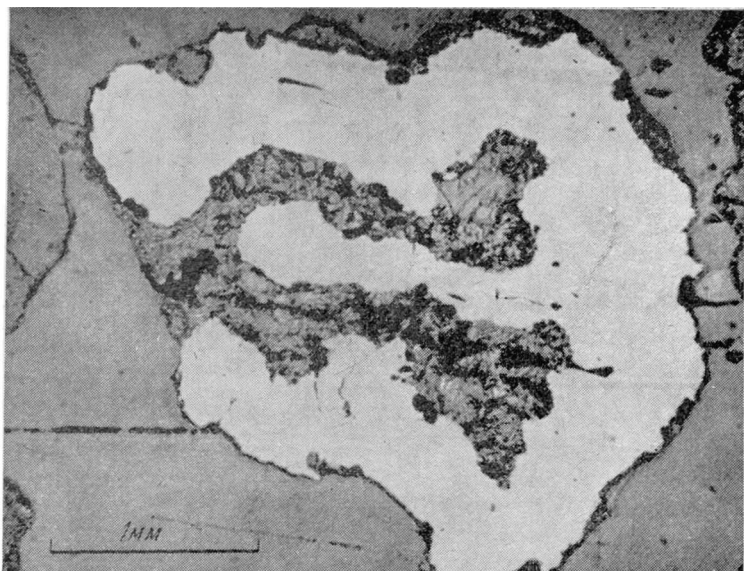


Рис. 13. Частица железокаменного метеорита из лунного реголита, доставленного «Аполлоном-11» (по Дж. Вуду).

Никелистое железо — белое, силикаты — темно-серые;

ситом при содержании Ni 6,9% и тэнитом, в котором содержится 14—30% Ni. Силикатная часть состоит из пизонита, кальциевого плагиоклаза, оливина, авгита и акцессорных минералов — хромита, ильменита, троилита. По составу частица напоминает мезосидеритовый метеорит.

Особенно сложно определить вещество каменных метеоритов среди силикатных частиц реголита. Большинство каменных метеоритов представлено хондритами, состоящими из округлых силикатных образований — хондр с различной структурой. Оливиновая хондра с колосниковой структурой описана в образце реголита 14259 (рис. 14). По составу и структуре это вероятно действительно хондра каменного метеорита. Хондры были определены в брекчии 14318. Однако 65% хондр в этой брекчии имеет состав не метеоритный, а типично лунный, это анортозито-норито-троктолитовые, криповые и базальтовые хондры. Присутствие присущее лунных хондр имеет

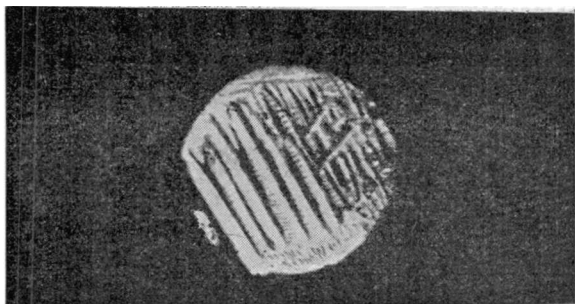


Рис. 14. Оливиновая хондра в лунном реголите 14259, доставленном «Аполлоном-14» (по Дж. Нелену).

Поле 0,2 мм.

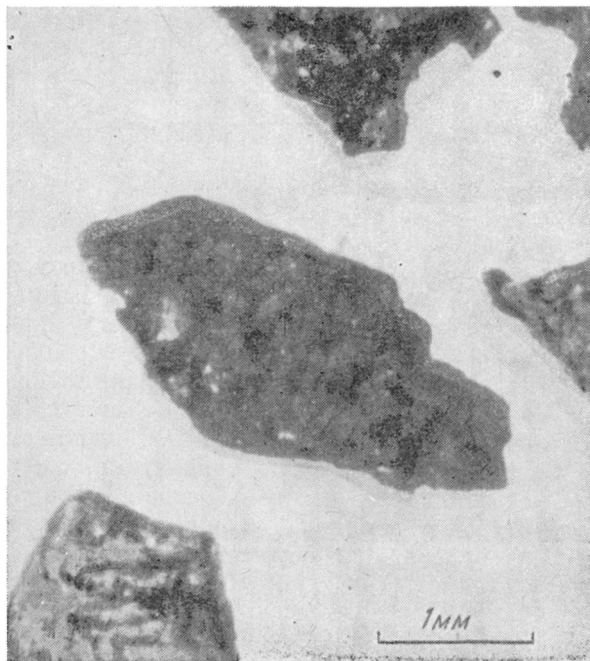


Рис. 15. Частица каменного метеорита (углистого хондрита) из реголита 12037, доставленного «Аполлоном-12» (по Дж. Вуду).

большое значение для познания условий образования хондр в метеоритах.

В образце реголита 12037, доставленном «Аполлоном-12», Дж. Вуд обнаружил частицу углистого хондрита размером 3 мм (рис. 15). Эта черная частица состояла из непрозрачной тонкозернистой матрицы, обогащенной никелем (что характерно для углистых хондритов), в которой были распределены зерна пироксена, сульфида, магнетита. Пироксен имел мозаичную структуру, типичную для зерен, претерпевших сильный удар. Поэтому возможно, что в действительности этот метеорит является не углистым хондритом, а переходным к уреилитам, которые содержат алмазы. В процессе исследования этот осколок углистого хондрита был напылен углеродом, и поэтому его углеродистое вещество, к сожалению, не исследовалось.

Таким образом, распространение метеоритных частиц в лунном реголите показывает, что формирование лунной поверхности в течение длительной истории происходило при участии метеоритной бомбардировки.

БИОЛОГИЯ ЛУНЫ

На основании астрономических наблюдений давно было установлено, что на Луне отсутствует атмосфера. Тем не менее неоднократно высказывались предположения о возможности существования на ней простейших форм жизни. Сравнительно недавно такую возможность подробно рассматривали Г. Юри, К. Саган, Э. Андерс. Эти рассматривания не были лишены оснований, если предположить, что Луна содержала в прошлом или содержит в настоящее время воду, присутствие которой могло способствовать возникновению собственно лунных форм жизни или же развитию форм жизни, занесенных на ее поверхность тем или иным путем (в результате переноса через космическое пространство, привноса земных форм жизни, например, при предпологаемо сверхмощных вулканических взрывах на ранних стадиях развития Земли и т. д.). Микроорганизмы могли адаптироваться к условиям лунной поверхности, либо сохраниться на Луне в фоссилизированном состоянии. Их выживанию, казалось бы, не благоприятствовало интенсивное длительное галактическое и солнечное космическое облучение, которому подвергалась и подвергается поверхность Луны, и другие факторы. Эти вопросы интересовали и автора этих строк, который специально проводил эксперименты по облучению протонами на ускорителе некоторых земных микроорганизмов, помещенных в метеорит. Однозначный ответ об отсутствии любых форм жизни на поверхности Луны был получен только на основании непосредственного изучения лунных проб, доставленных на Землю космонавтами и автоматическими космическими станциями. Хотя вода в лунных образцах практически не была найдена, в них обнаружены соединения органогенных элементов, что представляет исключительный интерес при рассмотрении различных аспектов химической эволюции органических соединений в космических условиях.

ПОИСКИ ЖИВЫХ И ФОССИЛИЗИРОВАННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В ЛУННЫХ ОБРАЗЦАХ

После возвращения первых экспедиций на Землю, космонавты и доставленные ими лунные образцы были подвергнуты карантину в целях проверки возможного привноса внеземных патогенных микроорганизмов. Карантинный персонал не обнаружил жизнеспособных микроорганизмов. Образец лунного реголита весом 50 г, доставленный «Аполлоном-11», изучал В. Ояма в специальной лаборатории, оборудованной стерильными препаративными и инкубационными боксами, с использованием атмосфер, которые содержали азот, кислород, углекислоту. Посевы проводились на 300 предварительно простерилизованных средах, содержащих различные соединения (в том числе продукты синтеза из метана, аммиака и воды при электрическом разряде). Температура инкубации была 10, 20, 35 и 55°С. В течение двухнедельного периода инкубации роста микроорганизмов не отмечено. Лишь в некоторых случаях появились округлые образования, напоминающие по форме колонии микроорганизмов. Их подробное изучение показало, что они имеют неорганический состав, причем преобладает железо. Эти агрегаты образовались из тонких минеральных частиц в течение первых четырех дней и в дальнейшем не увеличивались. После шестинедельной инкубации сделаны пересевы на идентичные среды; агрегаты по-прежнему не увеличивались.

При микробиологическом изучении фракций лунных пород из Моря Спокойствия Г. Тэйлор использовал культивирование в атмосферах азота, углекислоты и воздуха при температурах 4—55°С в среде агара, в тиогликолевом бульоне, в экстрактах земных почв и т. д. В течение трехнедельного периода инкубации роста микроорганизмов не отмечено.

Поиски лунных микроорганизмов проводились также с использованием фиксации углекислоты, меченой изотопом C^{14} , в образцах колонки реголита из Моря Спокойствия, в общих образцах реголита и в колонке реголита из Океана Бурь. Ни в этих экспериментах, ни при изучении образцов, доставленных последующими лунными экспедициями с различных мест посадок, когда использовались разные среды при культивировании широкого спектра

микроорганизмов, гетеротрофные, автотрофные, азотфиксирующие и другие микроорганизмы не были отмечены. Следовательно, на поверхности Луны жизнеспособные микроорганизмы отсутствуют.

Следы возможной прошлой жизнедеятельности, т. е. фоссилизированные частицы биологического происхождения, в лунных образцах из Моря Спокойствия и Океана Бурь искали Э. Баргун и В. Шопф. Лунный реголит, его тонкие фракции, остатки после их обработки плавиковой и соляной кислотами исследовались под микроскопом в проходящем и отраженном свете; осколки пород и брекчий, их внешние и внутренние участки изучались методом сканирующей электронной микроскопии. Во всех препаратах отсутствовали включения фоссилизированных микроорганизмов. В отдельных случаях отмечены волокна контаминационного происхождения. В тонкой фракции реголита (< 10 мк) были видны стеклянные частицы сферической, эллипсоидальной форм с прилипшими к ним еще более тонкими частицами. По своей форме они немного напоминали фоссилизированные микроорганизмы. По подсчету Д. Мюллера, в 1 г реголита содержится до $5 \cdot 10^6$ таких частиц. Их размеры 0,1—500 мк. В частицах иногда присутствуют пузырьки. Частицы содержат железо, кальций, алюминий, титан, цирконий. Частицы, имеющие такую же морфологию, отмечались в 1964 г. и автором этих строк в порошках метеоритов (углистых хондритов). Иногда их принимали за «организованные элементы». И в метеоритах, и в лунных образцах это в действительности миперальные образования.

Таким образом, на поверхности Луны нет ни живых микроорганизмов, ни каких-либо следов прошлой жизнедеятельности.

ВЫЖИВАНИЕ ЗЕМНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В ЛУННЫХ УСЛОВИЯХ И ТЕХНОГЕННАЯ КОНТАМИНАЦИЯ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Большой интерес представляет возможность выживания в условиях Луны земных микроорганизмов. Космонавты «Аполлона-12» доставили на Землю детали космического аппарата «Сервейор-3», который находился на Луне 31 месяц. Микробиологический анализ показал, что на поверх-

ностных участках аппарата микроорганизмов нет. Но внутри телевизионной камеры «Сервейора» найдены типичные земные бактерии *Streptococcus mitis*. Считают, что эти микроорганизмы попали внутрь камеры до запуска «Сервейора» и выжили в лунных условиях 2,5 года.

За время пребывания на Луне детали аппарата, которые раньше были белого цвета, стали светло-коричневыми и покрылись пылью. С целью выявления возможных источников техногенной контаминации органическими соединениями при посадке космического корабля на поверхность планет, зеркальная поверхность и внешняя часть (кожух) телевизионной камеры «Сервейора-3» изучались на содержание органических соединений. Детали в очень чистых условиях промывались из шприца бензолом и смесью бензола и метилового спирта. Экстракты исследовались масс-спектрометрическим методом.

На площади 35 см^2 зеркальной поверхности содержалось 80 мкг органических соединений, т. е. $2,3 \text{ мкг/см}^2$. Они состояли из диоктилфталата, углеводов типа $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, C_nH_{2n} , $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$ до $\text{C}_n\text{H}_{2n-10}$ ($n = 3 - 15$), органических кислот (главным образом пальмитиновой и стеариновой кислот), силиконов ($\text{C}_5\text{H}_{15}\text{O}_3\text{Si}_3$ и др.), а также диметилосказина и других продуктов сгорания ракетного топлива (диметилгидразина). На кожухе содержание органических соединений было найдено от 5 до $8,5 \text{ мкг/см}^2$. Они представлены углеводородами типа $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, C_nH_{2n} , $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$ и др. ($n = 2 - 29$), диоктилфталатом, силиконовым маслом, азот- и кислородсодержащими соединениями (винилстиреновый сополимер, метилоксазин и др.). Эти соединения могли быть привнесены руками космонавтов, из тефлоновых мешков, в которых детали транспортировались, из смазочных масел и т. д., в значительной степени они контаминировались продуктами сгорания топлива во время посадки на Луну. Образцы горной породы (дунит) специально обрабатывались продуктами сгорания ракетного топлива, и в них находили органические соединения, даже порфирины. Эти органические вещества были найдены в образцах лунного реголита, доставленных «Аполлоном-11», которые были отобраны непосредственно около лунного отсека (см. табл. 10). Эти образцы реголита были контаминированы продуктами сгорания топлива при посадке на Луну космического корабля. Возможность такого рода контаминации должна учитываться и при посадках на другие планеты.

Таблица 10

Соединения, найденные в продуктах сгорания ракетного топлива
и в экстрактах реголита, доставленного «Аполлоном-11»

Молекулярный вес	Продукты сгорания (по Б. Симонейту, 1969)	Реголит (по А. Бурлингейму, 1970)	Молекулярный вес	Продукты сгорания (по Б. Симонейту, 1969)	Реголит (по А. Бурлингейму, 1970)
17	NH ₃	NH ₃	45	CH ₃ NO	—
18	H ₂ O	H ₂ O		C ₂ H ₆ NH	—
26	CN	—	46	NO ₂	—
	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂		CH ₂ O ₂	CH ₂ O ₂
27	HCN	HCN	47	HNO ₃	—
28	C ₂ H ₄	—	50	C ₄ H ₂	C ₄ H ₂
	CO	CO	52	C ₄ H ₄	—
	N ₂	N ₂	54	—	C ₄ H ₆
29	CHO	—	55	HN ₂ CN	C ₄ H ₄ N ₃ O
30	NO	NO	56	—	C ₄ H ₈
	CH ₂ O	CH ₂ O	57	CH ₃ N ₃	—
31	CH ₃ NH ₂	—	58	(CH ₃) ₂ CO	CH ₄ N ₃ —C ₃ H ₆ O
32	CH ₃ OH	—	59	(CH ₃) ₃ N	C ₂ H ₅ NO
	O ₂	O ₂	60	HN ₂ NO	C ₂ H ₆ NO
38	C ₃ H ₂	—		CH ₃ COOH	—
39	C ₂ NH	—		CH ₃ NHNO	—
40	C ₃ H ₄	—	61	CH ₃ NO ₂	—
41	C ₂ H ₃ N	—		NH ₂ NHNO	—
42	C ₂ H ₂ O	C ₂ H ₂ O	69	CH ₃ N ₂ CN	—
	CNO	C ₃ H ₆	71	CH ₃ N ₂ CHNH	—
	C ₂ H ₄ N	—	73	CH ₃ N ₂ NO	—
43	CHNO	CHNO	74	(CH ₃) ₂ N ₂ O	—
	C ₂ H ₅ N	—	75	CH ₃ (NH) ₂ NO	—
	HN ₃	HN ₃	76	C ₆ H ₄	—
	CH ₃ CO ⁺	—	83	C ₃ H ₅ N ₃	—
44	CO ₂	CO ₂	87	C ₂ H ₅ N ₂ NO	—
	CH ₂ NO	C ₂ H ₆ N	149	—	C ₈ H ₆ O ₃
	C ₂ H ₄ O	C ₂ H ₄ O			

ПРОВЕРКА ТОКСИЧНОСТИ ЛУННЫХ ПОРОД НА ЗЕМНЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Г. Тэйлор проверял токсичность на земные микроорганизмы лунные образцы из всех мест посадок «Аполлона». Для опытов брались образцы реголита и с поверхности Луны, и из более глубоких частей колонок, причем с места посадки «Аполлона-15» исследовалось даже 20 образцов. Экспериментальными микроорганизмами были микробы *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* и др., грибки *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida albicans*. Только два образца лунного реголита (№ 10004 и 10005) из колонки, доставленной «Аполлоном-11», оказались токсичными для *Pseudomonas aeruginosa*. Причина неясна. Во всех других опытах образцы не были токсичными. Целесообразно отметить, что другие космические образцы-метеориты — также не токсичны для земных микроорганизмов, как было экспериментально показано нами в 1962 г. при посевах углеводородоксилирующих микроорганизмов на углистые хондриты Мигеи и Грозная.

Кроме того, проводилось биологическое изучение влияния лунных образцов на 30 видов растений. Обработке лунным реголитом были подвергнуты всходы бобов, томатов, пшеницы, сеянцы сосны и др. Растения выжили, причем иногда отмечался даже лучший рост, чем в обычных условиях.

Таким образом, лунный реголит не токсичен для земных форм жизни,

Глава 4

ОРГАНОГЕННЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ В ЛУННЫХ ОБРАЗЦАХ

В лунных образцах в различных формах присутствуют химические органогенные элементы. Их содержание в образцах, доставленных из различных районов Луны, приведено в табл. 11. Углерод и азот содержатся в относительно небольших количествах, соответственно до $225 \cdot 10^{-4} \%$ при сущего углерода и до $260 \cdot 10^{-4} \%$ азота, причем по сравнению с образцами горных пород в реголите и брекчиях их содержание повышено. Эти элементы входят в состав карбида (когенита), летучих форм углерода, нитридов и др. Водорода в образцах мало (до $44 \cdot 10^{-4} \%$), что согласуется с отсутствием воды на Луне. По сравнению с содержанием этих элементов в образцах много серы (до 0,21%), главным образом в составе сульфидов. Фосфора содержится до 0,2%, он присутствует в фосфатах. Содержание кислорода, определенное прямым методом, достигает 45%, он находится главным образом в силикатах и окислах. Кроме этих элементов, в лунных образцах присутствуют другие химические элементы, обычно входящие в состав живого вещества в виде элементов-примесей — железо ($\sim 12\%$ в образцах), магний ($\sim 4,2\%$), медь ($\sim 12 \cdot 10^{-4} \%$) и др. Образцы лунного реголита, по сравнению с образцами кристаллических пород, обогащены тяжелыми изотопами C^{13} , S^{34} , O^{18} .

УГЛЕРОД, ВОДОРОД И АЗОТ

Углерод

Содержание общего углерода в лунных образцах детально изучено К. Б. Муром, который определял углерод сжиганием образцов при $1800^\circ C$ с последующим анализом углекислоты методом газовой хроматографии. Другие исследователи определяли углерод методами пиролиза, масс-спектрометрии и др. Результаты, полученные различными методами, в общем согласуются.

Таблица 11

Содержание С, Н, N (10—4 %), Р, S, О (%) в лунных образцах

Станция	Образцы	С	Н	N	P	S	О
«Луна-16»	реголит	до 418	—	134	0,05	0,21	40,2—41,9
«Луна-20»	реголит	до 380	—	80	0,06	0,08	44,5—45,6
«Аполлон-11»	реголит	116—225	20—27	87—164	0,057	0,026—0,23	40,8—42,6
	брекчия порода	101—218 11—77	17—66 1—7	20—135 28—260	0,063 0,063	0,107—0,112 0,22—0,23	40,3—41,4 40,7
«Аполлон-12»	реголит	23—270	1—44	46—130	0,195	0,05—0,09	41,4—42,9
	брекчия порода	65—120 31—45	— <6	130 <10—54	— 0,047	— 0,06—0,08	— 38,7—42,1
«Аполлон-14»	реголит	42—190	13—24,5	72—194	0,193	0,07—1,01	43,7—44,8
	брекчия порода	19—225 35	— —	20—131 30—260	— 0,140	0,09 0,02—0,13	41,1—44,3 42,1—43,1
«Аполлон-15»	реголит	60—186	5—34	25—109	0,063	0,05—0,10	42,2—43,8
	брекчия порода	110—131 27	— —	42—61 <10	0,07 0,03	0,05—0,07 0,07	42,6 39,3
«Аполлон-16»	реголит	24—206	3,9	11—124	0,05	0,07	45,0—45,9
	брекчия анорозит	5—52 <10—50	— —	— <20	— 0,03	— 0,14	— 42,9
Земные базальты (среднее)		230—370	—	30	0,14	0,013	44,6
Каменные метеориты — базаль- товые ахондриты (среднее)		800	200	40	0,05	0,27	43,0

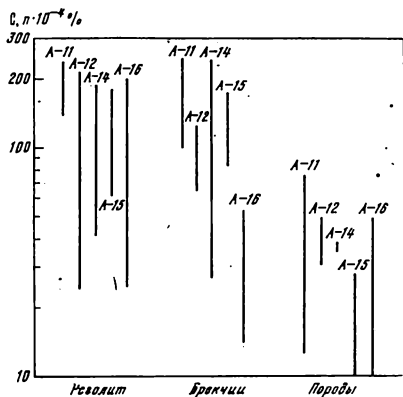


Рис. 16. Содержание углерода в лунных образцах реголита, брекчий и пород.

В образцах реголита, доставленного автоматическими космическими станциями «Луна-16» и «Луна-20», общее содержание углерода, определенное Б. Р. Симонейтом методом пиролиза, составляет, соответственно $418 \cdot 10^{-4}$ и $318 \cdot 10^{-4} \%$. По сравнению с другими образцами в них содержание углерода повышено; образцы в некоторой степени контаминированы волокнами тефлона и силиконовым маслом.

В различных лунных образцах углерод распределен неравномерно (рис. 16). Лунный реголит и, частично, брекчии содержат больше углерода (до $270 \cdot 10^{-4} \%$), чем образцы кристаллических пород (до $77 \cdot 10^{-4} \%$). Эта особенность характерна и для морских, и для материковых территорий. Например, по данным К. Б. Мура, материковые образцы, доставленные «Аполлоном-16», содержат следующее количество углерода: реголит (< 1 мм) от $(110-200) \cdot 10^{-4}$ до $280 \cdot 10^{-4} \%$, анортозитовая брекчия $(5-52) \cdot 10^{-4} \%$, анортозит $(20-22) \cdot 10^{-4} \%$. Для сравнения можно отметить, что в земных базальтах углерода содержится обычно $(15-150) \cdot 10^{-4} \%$, до $370 \cdot 10^{-4} \%$, в метеоритах-эвкритях $0,058-0,5 \%$. В распределении углерода в лунном реголите выявлены следующие особенности.

1. В образцах общего реголита, доставленных из различных районов Луны, содержание углерода отличается мало.

2. В некоторых образцах реголита, отобранных с поверхности и на глубине, нет очевидных различий или регулярности в распределении углерода по глубине колонки. Так, в реголите из Океана Бурь при содержании углерода в реголите, по данным К. Б. Мура, до $270 \cdot 10^{-4}\%$ в образцах из колонки его содержится (в $10^{-4}\%$): на глубине 8—9 см 150; 11—12 см 140; 20,8—21,8 см 150; 30—30,6 см 140; 36,7—37,2 см 170. В реголите из района Хэдли при содержании углерода $(60-186) \cdot 10^{-4}\%$ в образцах реголита из колонки его определено $(74-186) \cdot 10^{-4}\%$.

3. Отмечено пониженное содержание углерода в реголите образований, выброшенных при формировании относительно небольших молодых кратеров. В образцах реголита Океана Бурь из выбросов кратера Хэд и в траншейном реголите кратера Бенч К. Б. Мур определил соответственно $25 \cdot 10^{-4}$ и $23 \cdot 10^{-4}\%$ углерода. В образцах реголита, доставленного «Аполлоном-16» из материкового района, которые отбирались со дна и верха траншеи на валу кратера Плам, содержание углерода меньше в образце со дна траншеи ($67 \cdot 10^{-4}\%$), чем в образце с поверхности ($103 \cdot 10^{-4}\%$).

4. В образце реголита, просеянном и разделенном на фракции по размеру зерен, содержание углерода во фракциях увеличивается с уменьшением размера зерен. Во фракциях образца реголита из Моря Спокойствия углерода содержится во фракции 60—140 меш * $115 \cdot 10^{-4}\%$, 140—300 меш $210 \cdot 10^{-4}\%$, больше 300 меш $500 \cdot 10^{-4}\%$.

Эти особенности в распределении углерода показывают, что в реголите, кроме лунного углерода, т. е. образованного в результате дегазации Луны, присутствует также внелунный углерод, привнесенный на поверхность Луны метеоритами и солнечным ветром. Об этом свидетельствуют также результаты изучения форм углерода и его изотопного состава в лунных образцах.

В кристаллических породах Луны Э. Реддером описаны включения в виде мелких пузырьков, многие из которых заполнены углекислотой. В образцах же реголита и в брекчиях при микроскопических исследованиях найдены зерна когенита Fe_3C , а в редких случаях — частицы графита и даже карбоната-арагонита. При исследованиях лунного реголита методами пиролиза и масс-спектрометрии

* Меш — размерность фракции в ситовом анализе, определяемая числом отверстий сита, проходящихся на 1 линейный дюйм (25,4 мм).

многократно отмечалось, что углерод из образцов выделялся главным образом в виде окиси и двуокиси углерода и в небольшом количестве — в составе метана, а также других углеводородов. К. А. Квенволден считает, что, например, в образце реголита 12023 из Океана Бурь (7—21) · 10⁻⁴% углерода находится в составе карбида и ~2 · 10⁻⁴% — в составе присущее лунного метана. Причем, карбиды либо метеоритного происхождения, либо они образовались в результате взаимодействия углерода солнечного ветра с лунным веществом.

Изотопный состав углерода в различных лунных образцах отличается. В первоначально доставленных «Аполлоном-11» образцах была большая возможность контаминации как из продуктов сгорания ракетного топлива, так и с перчаток космонавтов. И. Каплан показал, что в образцах реголита «Аполлона-11», содержащих углерода (150—250) · 10⁻⁴%, углерод по изотопному составу был утяжелен, с величинами δC^{13} от +2 до +1,2%. В образцах с большим содержанием углерода (~400 · 10⁻⁴%) по изотопному составу (δC^{13} от -0,5 до -1%) он приближается к земному углероду. Продукты сгорания ракетного топлива имели величину $\delta C^{13} = -3,47\%$. При пиролизе реголита с увеличением температуры наблюдалось увеличение содержания тяжелого изотопа углерода: при пиролизе 150—250° C = 27 · 10⁻⁴%, $\delta C^{13} = -2,51\%$; 250—500° C = 19 · 10⁻⁴%, $\delta C^{13} = -1,2\%$; 500—750° C = 40 · 10⁻⁴%, $\delta C^{13} = +2,34\%$.

Последующие исследования изотопного состава лунного углерода показали более четкую корреляцию изотопного состава углерода в зависимости от его общего содержания в образцах: в образцах кристаллических пород содержалось меньше тяжелого изотопа C¹³, чем в обогащенных углеродом образцах реголита и брекчиях (табл. 12). Общая корреляция содержания углерода и его изотопного состава в лунных образцах показана на рис. 17.

Обогащенность лунного реголита (и брекчий) тяжелым изотопом C¹³ по сравнению с образцами кристаллических пород также может показывать, как и предыдущие данные, что в составе реголита присутствует внелунный углерод (метеориты-углистые хондриты подчас содержат больше тяжелого изотопа C¹³, чем земные образцы). Кроме того, возможно, происходила преимущественная потеря легкого изотопа углерода C¹² из лунного реголита при его постоянном перемешивании во время ударов метеоритов.

Водород

В виде H_2 , а также в составе H_2O , H_2S , CH_4 , C_2H_6 , HCN и других газов водород выделяется из образцов при их нагревании до $1400^\circ C$ в вакууме. Общее содержание водорода в лунных образцах невелико (см. табл. 11). Например, в образцах из Моря Спокойствия Дж. Оро определил масс-спектрометрическим методом в реголите $(0,41-1,2) \cdot 10^{-4}\%$ и в базальтах $(0,08-0,13) \cdot 10^{-4}\%$ водорода. В образце реголита 12023.9 он отметил $44,3 \cdot 10^{-4}\%$ H_2 и $26,8 \cdot 10^{-4}\%$ H_2O . И. Фридман в образцах, доставленных «Аполлоном-12», нашел содержание водорода в реголите $30 \cdot 10^{-4}\%$, в базальте $6,6 \cdot 10^{-4}\%$, т. е. содержание водорода, как и углерода, больше всего в реголите. Низкое содержание общего водорода согласуется с очень малым количеством H_2O и практически отсутствием водных минералов, хотя в очень редких случаях они отмечались. Водный аналог амфибола, например, описан в образце 10058 из Моря Спокойствия.

Таблица 12

Изотопный состав углерода в лунных образцах (стандарт PDB)

Станция	Образцы	Содержание $C_{10^{-4}}$ %	δC^{13} , %	Автор
«Аполлон-11»	реголит	116—170	+1,72 до +2,02	И. Каплан
	„	74—262	+1,01 до +1,86	С. Эпштейн
	„	41	+0,28 до +1,85	Дж. Оро
	реголит 10086	—	+2,0	К. Квенволден
	брекчия	132—198	+0,16 до +0,92	И. Каплан
«Аполлон-12»	базальты	11—77	—1,88 до —2,98	„
	реголит	109—140	+0,34 до +1,24	К. Квенволден
	„	37—140	—1,46 до +1,24	И. Каплан
«Аполлон-14»	базальт	14—21	—2,49 до —3,16	„
	реголит	43—89	+0,04 до +0,15	С. Эпштейн
«Аполлон-15»	брекчия 14321	24	—1,86	„
	реголит 15301	60	+0,51	„
	реголит из колонки	74—186	+0,74; —0,12; —2,88	И. Каплан
	брекчия 15015	110—131	—0,28 до —0,55	„
«Аполлон-16»	образец 61221.8	97	—1,39	С. Эпштейн

Вода, которая отмечалась при первых химических анализах лунного реголита, обусловлена частично примесью земной воды; когда реголит помещают из инертной среды (гелия или аргона) в атмосферную среду, он адсорбирует пары воды из воздуха, и вес реголита при этом заметно увеличивается.

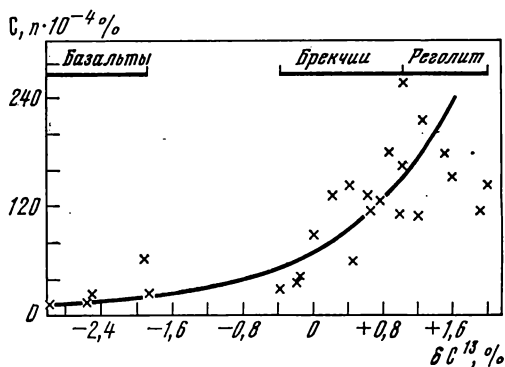


Рис. 17. Зависимость изотопного состава углерода от общего содержания углерода в лунных образцах (по С. Эпштейну).

Лунный водород по изотопному составу отличается от земного. Он изотопно более легкий. Содержание дейтерия в лунных образцах, например из Моря Спокойствия $(81—133) \cdot 10^{-4} \%$, в материковых образцах «Аполлона-16» $(88—130) \cdot 10^{-4} \%$. Причем образцы базальта содержат больше дейтерия, чем образцы реголита (табл. 13).

Э. Андерс считает, что Луна потеряла воду еще на ранней стадии своего развития, и во время агломерации вещества Луны содержание воды не превышало 370 г/см^2 .

Азот

Многочисленные определения содержания азота в лунных образцах были сделаны методами сжигания и хроматографического анализа (К. Б. Мур), масс-спектрометрии (Дж. Оро, И. Каплан), нейтронной активации (П. С. Гозл), пиролиза (П. К. Вжолек), нагревания до $250—500^\circ \text{C}$ с выделением химически связанного азота (О. Мюллер) и др. Содержание общего азота в лунных образцах не превышает $260 \cdot 10^{-4} \%$ (см. табл. 11). В образцах реголита, доставлен-

Таблица 13

Изотопный состав водорода в лунных образцах (стандарт SMOW)

Станция	Образцы	H ₂		H ₂ O		Автор
		Содержание, мг/моль г	δD, ‰	Содержание, мкмоль/г	δD, ‰	
«Аполлон-11»	реголит	50	—85	0,93— —11,58	от —15 до —48,3	С. Эпштейн
«Аполлон-12»	реголит	30	—32,5	—	—	П. Фридман
	базальт	6,6	+30,7	—	—	
«Аполлон-14»	реголит 14240	17,8	—73,1	17,4	—22,7	С. Эпштейн
	реголит 14422	24,5	—76,5	10,4	—34,1	
«Аполлон-15»	реголит 15301	26,1	—83,3	7,8	—23,0	»
«Аполлон-16»	образец 61221.8	3,9	—43,7	18,5	—17,2	»

ных автоматическими станциями «Луна-16» и «Луна-20», содержание азота, по определению П. К. Вжолка, составляет, соответственно, $134 \cdot 10^{-4}$ и $80 \cdot 10^{-4}\%$. Количество азота в общем коррелируется с содержанием углерода и преобладает в реголите. Так, К. Б. Мур в образцах из Моря Спокойствия определил содержание азота (в $10^{-4}\%$) в реголите — 87—164, в брекчиях — 69—135, в базальте — 28—85; в метеоритах — базальтовых ахондритах его найдено 31—45, в земных базальтах — 26—40, в дунитах — до 55. В образцах из Фра Мауро П. С. Гоэл определил азот (в $10^{-4}\%$) в реголите 72—90, в базальтах 21—22. Распределение азота в образцах реголита колонки из Океана Бурь, по данным К. Мура, следующее ($10^{-4}\%$): на глубине 8—9 см — 120; 11—12 см — 140; 20,8—21,8 см — 76; 30—30,6 см — 86; 36,7—37,2 см — 96; в образцах реголита из кратерных выбросов в том же районе определено ($45—50$) $\cdot 10^{-4}\%$ азота. При обработке образца реголита из Моря Спокойствия серной кислотой с последующим масс-спектрометрическим анализом Х. Хинтенбергер определил, что от общего азота ($\sim 100 \cdot 10^{-4}\%$) $< 10\%$ представлено

газообразным азотом; больше 65% находится в форме NH_4^+ , возможно в составе нитридов; 15% общего азота входит в состав нитратов. Лунный азот по соотношению изотопов $\text{N}^{14}/\text{N}^{15}$ близок к земному азоту. В образцах из района Хэдли И. Каплан определил в реголите из колонки (содержание азота $25-70 \cdot 10^{-4}\%$) величины δN^{15} (относительно воздуха) $-4,41$; $-0,04$; $+1,67\%$; в брекчии 15015 (содержание азота $42-61 \cdot 10^{-4}\%$) величины $\delta\text{N}^{15} = 0,15$ до $+0,32\%$. В лунном веществе азот представлен следующими компонентами: присущее лунной, метеоритной, компонентой солнечного ветра.

СЕРА, ФОСФОР И КИСЛОРОД

Сера

Количество серы в исследованных образцах Луны $0,02-0,23\%$ (табл. 14). В кристаллических породах ее несколько больше, чем в реголите и в брекчиях. Например, в образцах реголита из Океана Бурь, по данным И. Каплана, серы содержится $0,0509-0,062\%$ ($0,17\%$ FeS), а в образцах базальта $0,0603-0,0805\%$ ($0,21\%$ FeS). В образцах из Фра Мауро содержание серы, по данным Дж. Виллиса, в реголите (в среднем) $0,101\%$, в брекчии 14305 $0,094\%$, в кристаллической породе 14053 $0,132\%$. В образцах материковой зоны из района Декарт Б. М. Бансел определил серу в реголите 64421 в $0,07\%$, в образце апортозита 66095 $0,14\%$ и т. д.

Сера выделяется из образцов главным образом в составе H_2S при их обработке кислотами.

По сравнению с метеоритной серой, в частности серой троилита из железного метеорита Каньон-Дьябло, используемой в качестве стандартной, в лунных образцах сера несколько обогащена тяжелым изотопом S^{34} . Причем образцы реголита более обогащены тяжелым изотопом, чем образцы кристаллических пород (см. табл. 14). Например, для образцов реголита из Моря Спокойствия, по данным И. Каплана, величина δS^{34} составляет около $+5\text{‰}$, а для образцов базальта $+1,2\text{‰}$ (рис. 18). Как и для углерода, это утяжеление объясняется вероятной потерей легкого изотопа серы из реголита.

Таблица 14

Изотопный состав серы в лунных образцах
(стандарт — сера троилита из железного метеорита Каньон-Дьябло)

Станция	Образцы	Содержание S, %	δS^{34} , ‰	Автор
«Аполлон-11»	реголит	0,026—0,068	+5,4 до +8,6	К. Квенволден
	»	0,064—0,077	+4,4 до +8,2	И. Каплан
	брекчии	0,107—0,112	+3,3 до +3,6	»
	базальты	0,22—0,228	+1,2	»
«Аполлон-12»	реголит	0,0509—0,062	+4,9 до +8,8	«
	базальт	0,0603— —0,0805	—0,1 до —0,3	»
«Аполлон-14»	реголит	0,0701— —0,1149	+0,9 до +9,7	К. Реес
«Аполлон-15»	реголит из	0,0468—	+4,3 до +9,9	И. Каплан
	колонки	—0,1026		
	брекчия 15015	0,0586— —0,0673	+6,3 до +7,6	»
Метеориты — углистые хонд- риты	Маррей Альенде	0,46 1,99	—0,1 до +0,8 +0,7 до +1,1	К. Квенволден »

Фосфор

Содержание фосфора в лунных образцах достигает 0,2% (см. табл. 11). В образцах реголита его содержится больше, чем в кристаллических породах. Например, при анализе образцов из Моря Спокойствия на масс-спектрометре с ионным источником Дж. Оро определил фосфор в образцах реголита 0,011—0,027% и в кристаллических породах 0,0059—0,025%. Фосфор находится в составе апатита $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl})$, а также витлокиста $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, шрейберзита $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$ и криповой компоненты.

Кислород

При химических анализах содержание кислорода обычно определяется пересчетом из результатов анализа. В лунных же образцах кислород определен прямыми методами — нейтронной активации (М. Джангхарбани), фтори-

рованием (Р. Н. Клейтон) и т. д. Содержание кислорода находится в пределах 38,7 — 45,9%, что согласуется с его содержанием в земных базальтах (43,4%) и метеоритах — эвкритях (42,7 %). В лунных образцах из морских районов кислорода меньше, чем в образцах из материковых зон (см. табл. 11). Например, в образцах реголита, доставлен-

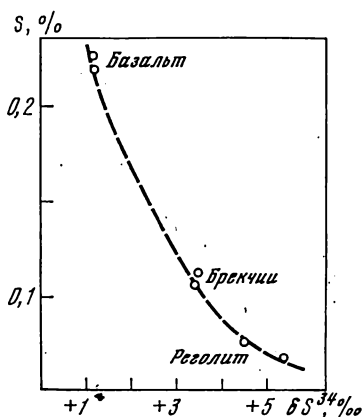


Рис. 18. Зависимость изотопного состава серы от общего содержания серы в лунных образцах, доставленных «Аполлоном-11» (по И. Каплану).

ных «Луной-16», Р. Клейтон определил 40,2—41,9% кислорода. Во фракциях реголита с размером зерен $< 125 \text{ мк}$, доставленных «Луной-20» из материкового района, содержание кислорода составляет 44,5% по данным Р. Клейтона или 45,6% по данным М. Джангхарбани и В. Эмана. В образцах материкового района из области Декарт В. Эман определил в реголите 45,0% и в анортозите 42,9% кислорода. Содержание кислорода несколько больше в образцах реголита, чем в породах. Например, в лунных образцах из Океана Бурь (по данным Х. Вэнке) реголит содержит 42,6%, брекции 41,7%, породы 41,4—42,1% кислорода.

Кислород реголита по сравнению с кислородом кристаллических пород содержит больше тяжелого изотопа O^{18} (табл. 15). Например, по данным С. Эпштейна, величины δO^{18} для образцов из Океана Бурь имеют следующие значения: реголит $12070 \pm 6,26\text{‰}$, базальт $12064 \pm 5,82\text{‰}$; для образцов из района Хэдли: реголит $+6,12$ до $+6,30\text{‰}$, брекции $+5,83$ до $+6,07\text{‰}$, базальт $+5,73$ до $+6,13\text{‰}$, анортозит $+6,05\text{‰}$.

Минералы, слагающие горные породы Луны, отличаются по изотопному составу кислорода. Так, для базальта

Таблица 15

Изотопный состав кислорода в лунных образцах
(стандарт SMOW)

Станция	Образцы	δO^{18} , ‰	Автор
<i>Образцы в целом</i>			
«Луна-16»	реголит	6,20	Р. Клейтон
«Луна-20»	»	6,18	Х. Тейлор
	»	5,67	Р. Клейтон
«Аполлон-11»	»	6,18	С. Эпштейн
	»	6,21	Р. Клейтон
	»	6,26; 6,36	Х. Тейлор
	брекчия	6,31	»
	брекчия 10061	6,39	С. Эпштейн
	базальт	5,76; 6,33	Х. Тейлор
	»	5,7	Р. Клейтон
«Аполлон-12»	реголит	5,81	С. Эпштейн
	реголит 12070	6,26	»
	базальт 12064	5,82	»
	базальт	5,6	Р. Клейтон
«Аполлон-14»	реголит	6,18—6,62	С. Эпштейн
	»	6,24	Р. Клейтон
	брекчий	5,82—6,58	С. Эпштейн
	порода	5,5	Р. Клейтон
«Аполлон-15»	реголит	6,12—6,30	С. Эпштейн
	»	5,87	Р. Клейтон
	брекчий	5,83—6,07	С. Эпштейн
	базальт	5,4—5,7	»
	»	5,73—6,13	»
	анортосит 15415	6,11	Х. Тейлор
	анортосит	6,05	С. Эпштейн
«Аполлон-16»	анортосит	5,7	Р. Клейтон
	анортосит 68415	6,17	Х. Тейлор
<i>Минеральные фракции, базальт 10057.39</i>			
«Аполлон-11»	плагиоклаз	6,30	Х. Тейлор
	клинопироксен	5,83	»
	ильменит	4,12	»
	порода в целом	5,68	»
	порода в целом (подсчитано)	5,71	»

10057 из Моря Спокойствия величина δO^{18} (по данным Х. Тэйлора) составляет $+5,68\%$; плагиоклаз из этого базальта имеет $\delta O^{18} + 6,30\%$; кислород клинопироксена более облегчен, для него $\delta O^{18} + 5,83\%$ (см. табл. 15). Фракционирование изотопного состава кислорода происходило в процессе кристаллизации. Некоторое значение в разделении изотопов кислорода имело влияние солнечного ветра, как было показано корреляцией изотопного состава кислорода реголита и содержанием солнечной компоненты инертных газов в реголите Моря Спокойствия и Океана Бурь. На обогащение тяжелым изотопом кислорода реголита оказали влияние метеоритные удары; так, частицы стекла до $0,4\%$ обогащены тяжелым изотопом кислорода по сравнению с кристаллическими породами.

ФОРМЫ УГЛЕРОДА В ЛУННЫХ ОБРАЗЦАХ

ИЗУЧЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ УГЛЕРОДА И ДРУГИХ ОРГАНОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Выяснение форм нахождения углерода (и, в частности, органических соединений) в веществе Луны представляет исключительный интерес и для экзобиологии, и для космохимии углерода. Поэтому углеродистые вещества подробно изучались многими группами исследователей. Исследование очень усложнялось из-за небольшого содержания углерода. Современные методы изучения малых количеств углеродистых веществ (многие из этих методов были отработаны при анализе органических соединений в метеоритах) позволили подробно охарактеризовать формы нахождения углерода и других органогенных элементов в лунных образцах. Причем наиболее детально изучались образцы реголита, поскольку углерод в них находится в большем количестве и в более разнообразных формах, чем в кристаллических породах. Кроме того, вещество реголита является более благоприятной средой для образования органических соединений.

При изучении углеродистых соединений лунных образцов использовались различные методы: 1) экстракция органическими растворителями, которые, как известно, извлекают из образцов органические вещества; 2) кислотный гидролиз — обработка реголита соляной, плавиковой или другими кислотами для разрушения минеральных компонентов и высвобождения углеродистых соединений; при этом разрушается, в частности, карбид железа, поэтому часто использовались дейтерированные кислоты, в которых водород замещен дейтерием; 3) пиролиз — нагревание образцов в вакууме до температур 1400°C , когда выделяются газообразные соединения, но большая часть соединений при этом образуется в результате разложения более

сложных веществ; 4) дробление и истирание образцов в вакууме; находящиеся в них газообразные соединения при этом выделяются. Газы, выделенные при таких обработках лунных образцов, анализировались с высокой точностью на газовом хроматографе и масс-спектрометре.

Результаты многочисленных исследований показали, что в процессе пиролиза углерод выделяется из образцов реголита главным образом в виде окиси углерода CO , которая преобладает, и в виде углекислого газа CO_2 , меньше — в виде CH_4 . В небольших количествах отмечались другие углеводороды. CO_2 и CO иногда выделяются и при гидролизе, но главная форма углерода при гидролизе образцов — метан, как и при их дроблении. С применением дейтерированных кислот удалось показать, что этот метан имеет двойную природу: он образуется при гидролизе карбида железа и частично присутствует первоначально. При пиролизе и гидролизе определен, кроме того, ряд других газообразных соединений — аммиак, сероводород и т. д. Ниже рассматриваются эксперименты по нахождению форм углерода и других органогенных элементов.

Экстракция

Растворимость органических соединений — высокомолекулярных углеводов в органических растворителях, как известно, широко используется с целью извлечения этих соединений из горных пород и их последующего исследования. Методы экстракции были применены многими авторами при изучении лунного реголита, доставленного, особенно, с первых мест посадок «Аполлона». Эти исследования показали, что содержание экстрагируемых органических веществ в реголите очень низкое и подчас может объясняться контаминацией продуктами сгорания ракетного топлива или загрязнением образцов в процессе их отбора и транспортировки.

Экстракция образцов реголита «Аполлона-11» чаще всего проводилась смесью бензола и метилового спирта (3:1) в аппарате Сокслета. В экстрактах образцов реголита, весивших 50 г, У. Мейнштейн методом газовой хроматографии не обнаружил заметных количеств парафиновых углеводородов (алканов) ряда C_{15} — C_{30} . Их концентрация была $< 10^{-7}\%$, в то время как в земных горных породах их со-

держание обычно превышает 0,01%. Другой образец реголита весом 14,8 г П. И. Эбел экстрагировал этими же растворителями в гелиевой атмосфере специально сконструированного аппарата. В экстрактах, исследованных методами газовой хроматографии и масс-спектрометрии, если алканы $C_{12} - C_{32}$ и присутствовали, их концентрация в образце $< 5 \cdot 10^{-7}\%$. Измеримых количеств органических соединений ($> 10^{-7}\%$) в образце реголита весом 1 г, доставленном «Аполлоном-11», не нашел и Дж. Оро. Два образца реголита 12023.9, доставленные «Аполлоном-12», весом 0,126 г и 1,158 г, он экстрагировал в аппарате Сокслета. В экстрактах, исследованных методом газовой хроматографии, не было органических соединений при чувствительности, соответственно, 10^{-8} и $10^{-9}\%$. Образец реголита 10086.5 весом 23 г С. Р. Липский экстрагировал растворителями в аппарате Сокслета; экстракт исследовался методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в области 30 — 1166 гц с тетраметилсиланом в качестве растворителя. На спектрах проявились пик при 133 гц и мультиплет при 305 гц, обусловленные растворителем. При чувствительности $10^{-4}\%$ органические соединения не отмечены. С. Поннамперума экстрагировал смесью бензола и метанола образец реголита 10086; экстракт разделялся на фракции методом хроматографии на силикагелевой колонке. В элюате гексана методом газо-жидкостной хроматографии не обнаружены алканы ряда $C_{12} - C_{32}$ при концентрации выше $2 \cdot 10^{-9}\%$. В элюате метанола не были найдены жирные кислоты при содержании выше $10^{-6}\%$. После экстракции органическими растворителями образец реголита экстрагировался водой. В водном экстракте, также исследованном газо-жидкостной хроматографией, не найдены углеводы при содержании выше $6 \cdot 10^{-8}\%$.

Следовательно, при малом возможном содержании экстрагируемых органических соединений в реголите их определение хроматографическими методами затруднительно. А. Л. Бурлингейм экстрагировал образец реголита, доставленный «Аполлоном-11», весом 19,8 г смесью бензола и метанола. В экстракте методом газовой хроматографии органические соединения не найдены. Другая часть экстракта анализировалась масс-спектрометрическим методом. В экстракте обнаружены углеводороды до C_{10} (включая C_2H_2 , C_3H_4 , C_4H_8), а также CO , CO_2 , N_2 , фталаты и ряд других соединений — NH_3 , NO , $CHNO$, CH_2NO , C_2H_6N , C_2H_5NO ,

C_2H_4NO , которые присутствовали также в продуктах сгорания ракетного топлива. Содержание углеводов и фталатов — результатов контаминации было $< 10^{-6}\%$. Масс-спектрометрический анализ бензол-метанольных экстрактов реголита 12011, по данным В. Гендерсона, показал присутствие следующих соединений: HCN , NO , HNO , C_2H_3CN , $CHNO$, C_2H_3N , CHO_2 , CH_3NO , CH_2O_2 , CH_4NO , C_4H_9 , C_8H_8 , $C_8H_5O_3$. Р. К. Марфи экстрагировал реголит 10086 весом 50 г смесью бензола и метанола при встряхивании в запаянной ампуле при $60^\circ C$ с последующей обработкой соляной и плавиковой кислотами и экстрагированием дихлорметаном. В экстрактах, исследованных газовой хроматографией и масс-спектрометрией, найдены дифенил, стирол, нафталин, дигидронафталин, индол, антрацен, возможно присутствующие образцу. Их содержание не превышало $10^{-7}\%$.

Детальное изучение экстрагируемых органических соединений в реголите, доставленном «Аполлоном-11», выполнили также Б. Надь с соавторами. Для анализа взяты образцы реголита весом 22,81, 22,61 и 16,44 г из верха, середины и нижней части контейнера. После экстракции смесью бензола и метанола (4 : 1) в течение часа осталось соответственно 1,7, 0,3 и 0,2 мг экстракта, окрашенного в желтоватый цвет. Экстракты хроматографировались двумя системами растворителей: н-гексан и н-гексан — этиловый эфир — уксусная кислота (95 : 5 : 2 по объему). При изучении в ультрафиолетовой области найдены насыщенные углеводороды (при содержании $2 \cdot 10^{-4}$, $0,5 \cdot 10^{-4}$ и $0,3 \cdot 10^{-4}\%$), сера ($0,2 \cdot 10^{-4}$, $0,9 \cdot 10^{-4}$ и $1,8 \cdot 10^{-4}\%$) и желтое флуоресцирующее вещество. В контрольных растворах содержалось $< 10^{-6}\%$ углеводов. При масс-спектрометрическом анализе также определялись углеводороды и сера. Причем при $110—115^\circ C$ отмечены серии алкил-ионов C_nH_{2n+1} (их содержание наибольшее в первом экстракте), при более высокой температуре проявились ионы углеводов ряда $C_{25}—C_{10}$. Экстракт не проявил оптической активности при чувствительности поляриметра $0,3 \cdot 10^{-3}$ градуса. Не исключено однако, что часть этих соединений обусловлена контаминацией при транспортировке образцов.

После обработки образцов реголита соляной кислотой в них не найдены пуриновые и пиримидиновые основания при чувствительности определения $4 \cdot 10^{-7}\%$. В солянокислых гидролизатах образца реголита (10086) С. Поннамперума

газо-жидкостной хроматографией и масс-спектрометрией обнаружил органосилоксаны, имеющие Si — C связь и состав $\{R[OSi(CH_3)_2]_n\}^+$ при содержании $35 \cdot 10^{-4}$ — $50 \cdot 10^{-4}\%$. Сходные соединения им найдены и в метеорите Альенде ($45 \cdot 10^{-4}$ — $60 \cdot 10^{-4}\%$). Природа этих соединений не выяснена. А. Л. Бурлингейм исследовал также содержание органических веществ, экстрагируемых органическими растворителями после деминерализации образца реголита плавиковой кислотой. Этот деминерализованный остаток представлял собой белые зёрна с черными частицами, составляющими $< 1\%$ остатка. После экстракции 22 мг остатка смесью бензола и метанола экстрагируемые органические соединения в нем не найдены.

Таким образом, в лунном реголите, вероятно, отсутствуют высокомолекулярные углеводороды, жирные кислоты, углеводы, пуриновые и пиримидиновые основания, которые были бы присущи лунному веществу.

Гидролиз

Деминерализация — разрушение минеральных фаз лунного реголита проводилась обработкой соляной, плавиковой, фосфорной кислотами с последующим анализом газов методами газовой хроматографии и масс-спектрометрии. При кислотном гидролизе образцов лунного реголита выделяются метан, этан, другие углеводородные газы, а также CO_2 , CO, H_2 , N_2 , NH_3 , HCN, H_2S , SO_2 , COS, CS_2 , O_2 , H_2O . Содержание углерода, выделенного в составе углеводородов при гидролизе лунных образцов, приведено в табл. 16. Общее содержание углерода в составе углеводородов в базальте 10049 составляет $0,045 \cdot 10^{-4}\%$, а в образцах реголита и брекчии достигает $32 \cdot 10^{-4}\%$.

С. Чанг исследовал образцы реголита 10086, которые вначале дегазировались в вакууме при 150° и затем гидролизировались в HCl в запаянной ампуле. Газы анализировались газо-жидкостной хроматографией и масс-спектрометрией. Они были представлены углеводородами ряда C_1 — C_4 : метаном, этеном, ацетиленом, этаном, пропаном, пропеном и др. Содержание углерода в газах двух образцов составило $21,3 \cdot 10^{-4}$ и $4,9 \cdot 10^{-4}\%$. Сходным образом гидролизировался образец метеорита Мигей и образец когениита из железного метеорита Каньон-Дьябло. Углеводороды были выделены в основном те же, но при меньшем

Таблица 16

Содержание углерода в составе углеводородов, выделенных при гидролизе кислотами лунных образцов (10^{-4} %)

Форма углерода	Гидролиз HCl (по С. Чангу, 1970)		Гидролиз H_3PO_4 (по С. Чангу, 1970)			Гидролиз HF (по Г. Гендерсону, 1971)		
	реголит 10086.3 (а)	реголит 10086.3 (б)	реголит 10084	брекчия 10002.5а	базальт 10049	реголит 10086	брекчия 10059	реголит 12023.6
CH_4	6,3	0,86	0,36	0,66	0,029	13,2	23,3	11,4
C_2H_4	3,8	1,10	0,10	0,11	0,007	2,9	5,3	3,0
C_2H_2	1,4	0,25	0	0	0			
C_2H_6	5,0	2,0	0,20	0,24	0,009			
C_3H_6	2,9	0,20	сл.	0,034	сл.	4,5	2,5	2,1
C_3H_8	1,3	0,19	сл.	0,052	сл.			
Другие углеводороды ряда C_3	0,58	0,29	0	0	0			
Углеводороды ряда C_4	0,20	0	сл.	0,036	сл.	1,1	0,9	1,2
Сумма	21,3	4,9	0,76	1,13	0,045	21,7	32,1	17,6

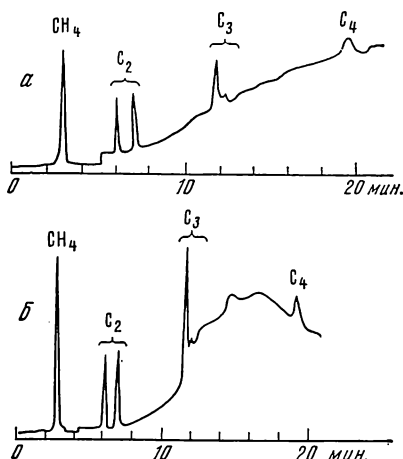
содержании. Так, в метеорите Мигей присутствовали газы (10^{-4} %): C_2H_6 0,46; C_3H_6 0,18; C_3H_8 1,34; другие углеводороды ряда C_3 0,12; всего $2,1 \cdot 10^{-4}$ %. Найденные в лунном реголите углеводороды могли образоваться при гидролизе карбидов. Сходным образом С. Чанг изучал реголит 12023. При его гидролизе выделились углеводороды ряда $C_1 - C_4$, содержание углерода в них составляло $16,8 \cdot 10^{-4}$ %. Дж. Оро гидролизировал образец реголита 12023.9 весом 0,95 г 12н HCl. Из реголита выделились CO, N_2 , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , H_2S . После гидролиза фосфорной кислотой образцов реголита, брекчии и базальта, доставленных «Аполлоном-11», С. Чанг нашел меньшее содержание углеводородов (см. табл. 16). Главный газ, который выделяется при таком гидролизе, по данным Д. Оро, так же как при гидролизе соляной кислотой, является сероводород; содержание тяжелого изотопа S^{34} в нем составляет 4,2 %.

После обработки лунных образцов плавиковой кислотой из них выделяется $17 \cdot 10^{-4} - 32 \cdot 10^{-4}$ % углерода в составе углеводородов (см. табл. 16, рис. 19). При этом способе

обработки образцов реголита, доставленных «Аполлоном-11», П. И. Эбел масс-спектрометрическим методом определил Ar , CH_4 , O_2 , N_2 , H_2 и др. Метана найдено до $2 \cdot 10^{-4} \%$. В частности, в образце реголита весом 0,270 г CH_4 (в $10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$) составляло 300, в образце весом 0,201 г 400, в образце реголита весом 0,213 г после пиролиза при

Рис. 19. Хроматограммы углеводородных газов, выделенных из лунных образцов при обработке HF -кислотой (по В. Гендерсону):

α — реголит 12023; β — брекчия 10059 (внутренняя часть).



900°C соответственно 100. В метеорите Альенде метана найдено $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$ ($2 \cdot 10^{-6} \%$), в метеорите Капоета — $6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$ ($4 \cdot 10^{-6} \%$). В образце реголита, доставленного «Аполлоном-11», весом 17,8 г А. Л. Бурлингейм при масс-спектрометрическом анализе деминерализованного остатка определил метан, Ne , Ar и значительное содержание CO (содержание углерода в виде CO $66 \cdot 10^{-4} \%$).

Следовательно, при гидролизе лунного вещества выделяются углеводородные газы, главным образом метан, а также CO , CO_2 и другие газы.

Пиролиз

Наиболее подробное изучение лунного вещества проведено методами пиролиза при нагревании образцов в вакууме, часто непосредственно в ионном источнике масс-спектрометра, причем нагревание осуществлялось при определенной температуре или ступенчато с масс-спектрометриче-

Таблица 17

Соединения, найденные при пиролизе образцов реголита

Соединение	Относительное содержание	Соединение	Относительное содержание
CO	+++ *	N ₂	+
CO ₂	+++	NH ₃	++
CH ₄	++	HCN	+
C ₂ H ₂	+	H ₂ S	++
C ₂ H ₄	+	SO ₂	++
C ₂ H ₆	+	CS ₂	+
C ₃ H ₈	+	COS	+
Углеводороды ряда C ₄ и выше	+	H ₂ O	++
H ₂	++	O ₂	+
		редкие газы	+

* Знаком + обозначена относительная распространенность соединений.

ским анализом температурных фракций продуктов пиролиза, либо пиролиз производился в инертной (гелиевой) атмосфере. До пиролиза производилось предварительное дегазирование образцов при температуре 100—150° с целью извлечь возможные следы атмосферных газов. Основные углеродсодержащие компоненты, которые выделяются при пиролизе до 1400°С,— CO, CO₂, CH₄, причем CO значительно преобладает. Кроме того, в небольших количествах выделяются другие углеводородные газы, а также H₂, N₂, NH₃, HCN, H₂S, SO₂, H₂O и др. (табл. 17).

Образцы реголита, доставленные автоматическими станциями «Луна-16» и «Луна-20», весом 4,7 и 4,1 мг исследовались Б. Р. Симонейтом с соавторами методом вакуумного пиролиза при нагревании до 1400°С; анализ выделенных газов проводился методом высокоразрешающей масс-спектрометрии. Основные газообразные виды, которые были определены в этих образцах, приведены в табл. 18. Из углеродсодержащих газов преобладает CO ($>300 \cdot 10^{-4}\%$), общее содержание CO₂ $\sim 70 \cdot 10^{-4}\%$, количество метана составляет соответственно $11,8 \cdot 10^{-4}$ и $82,5 \cdot 10^{-4}\%$. В заметных количествах присутствует вода

Таблица 18

Газы, выделенные при вакуумном пиролизе из образцов, доставленных «Луной-16» и «Луной-20», в 10⁻⁴% (по Б. Р. Симонейту, 1973)

Компо- ненты	Температурные фракции	Образец Л-16-А-7, «Луна-16»	Образец 22001.3, «Луна-20»
CO	600°	35	37
	600—1400°	313	270
	общая	348	307
CO ₂	600°	39	45
	600—1400°	31	28
	общая	70	73
CH ₄	600°	6,7	24,5
	500—650°	—	28,6
	600—950°	3,4	—
	650—1400°	—	29,4
	950—1400°	1,7	—
	общий	11,8	82,5
C	общий	418	380
N	общий	134	80
H ₂ O	общая	473	653

и азот. При небольших содержаниях ($<10 \cdot 10^{-4}\%$) в образцах определены C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₈, бензол, толуол, NH₃, HCN, NO, SO₂, H₂S.

Характер выделения основных углеродсодержащих газов при нагревании показан на рис. 20. Большая часть CO выделяется из обоих образцов при температурах 600—1400°, с максимумами при 800—900° и 1050—1150°. Значительно меньшие количества CO выделены при нагревании до 600°. При этой температуре выделяется значительная часть CO₂. Характер выделения метана из обоих образцов отличается. Из образца реголита, доставленного «Луной-16», больше всего метана выделяется при температурах 350—600°, 600—900°, небольшое количество — при 1100—1400°. Для реголита, доставленного «Луной-20», максимумы выделения метана отмечены при температурах 300—500°, 500—650°, 650—1000°, небольшие количества метана выделены при 1000—1400°.

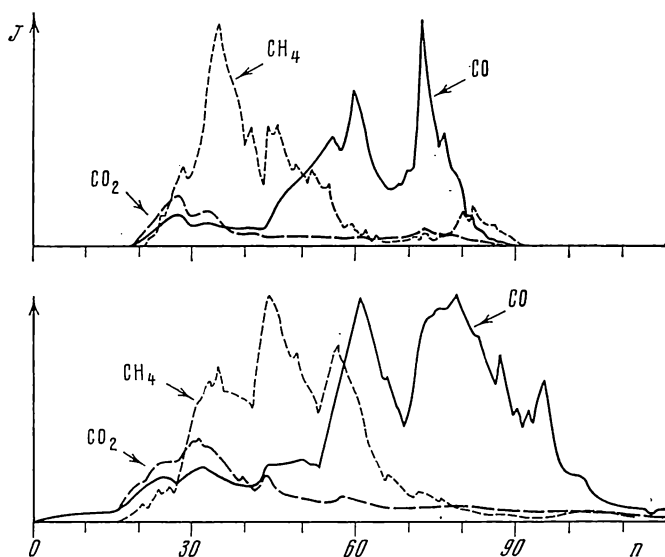


Рис. 20. Характер выделения CO , CO_2 и CH_4 (масс-пирограммы) при нагревании образцов реголита, доставленных «Луной-16» и «Луной-20» (по Б. Симонейту).

По оси абсцисс — сканирующее число.

Другие углеводороды, находящиеся при малых содержаниях, также имеют различный характер выделения. Из образца реголита «Луны-16» ацетилен C_2H_2 , этилен C_2H_4 , этан C_2H_6 и другие углеводороды до C_5H_{12} максимально выделяются при $350\text{--}600^\circ$, для реголита «Луна-20» слабо проявились максимумы выделения этих углеводородов при различных температурах в процессе нагревания от 250° до плавления образца. Ароматические углеводороды, главным образом бензол и толуол, из образца реголита «Луны-16» выделены при температурах $450\text{--}600^\circ$ и — в следовых количествах — при $600\text{--}1250^\circ$, а из реголита «Луны-20» они выделялись постепенно при температурах $300\text{--}1200^\circ$. Кроме того, по масс-спектрам отмечено небольшое присутствие тефлона и силиконового масла контактного происхождения.

Азот N_2 выделяется из образцов при их высокотемпературном нагревании, для реголита «Луны-16» — с максимумами при 900 и 1100° и для реголита «Луны-20» —

при 800 и 1100°. При меньших температурах выделяются другие азотсодержащие газы — HCN (400—700°), NH₃ (450°), NO (250—350°). Вода выделяется главным образом при нагревании до 600°. Сера вначале выделяется в виде SO₂ (150—500°), затем — в составе H₂S и SO₂ (с максимумами при 1150—1250°). Кроме того, в следовых количествах отмечен кислород, а также редкие газы.

Состав газов, выделяющихся при ступенчатом нагревании (до 800° С в вакууме) образца реголита, доставленного «Луной-16», исследовали Ю. А. Сурков с соавторами. Масс-спектрометрическим и термовесовым анализами определены газы при их следующем содержании (в 10⁻⁴%): H₂O — 134,8; CO₂ — 83,6; CO — 63,7; H₂ — 20,8; N₂ — 8,8; He — 5,7 и следы метана. Свободный кислород не обнаружен. Общее содержание газов $317,4 \cdot 10^{-4}\%$.

Методами пиролиза подробно изучены образцы, доставленные при полетах пилотируемых космических кораблей «Аполлон».

С целью определить общее содержание пиролизуемых органических соединений продукты пиролиза образцов реголита «Аполлона-11» исследовались детектором пламенной ионизации. При пиролизе образца реголита 10086 весом 30 мг при 800° в атмосфере водорода и гелия С. Поннамперума определил $40 \cdot 10^{-4}\%$ летучих соединений. В образце метеорита Альенде, исследованном для сравнения, их содержалось $14 \cdot 10^{-4}\%$, а в контрольном песке $1 \cdot 10^{-4}\%$. При пиролизе ряда образцов при 850° и анализе продуктов методом водородной пламенной ионизации Р. Д. Джонсон нашел содержание органических соединений, присущих лунным породам, $< 10 \cdot 10^{-4}\%$. Дж. Оро исследовал методом водородной пламенной ионизации образцы реголита (35—55 мг) при их нагревании до 600° в пиролизаторе. Отмечено около 10 соединений. Количество органических соединений при этом определено $0,6 \cdot 10^{-4}\%$.

При масс-спектрометрическом анализе продуктов пиролиза проявляется целый ряд газообразных соединений.

Образцы реголита, доставленные «Аполлоном-11», А. Л. Бурлингейм нагревал в вакууме при 150°, летучие соединения анализировал масс-спектрометрическим методом: Газы наблюдались в следовых количествах, это — N₂, O₂, Ar, H₂O, CO, CO₂ и CH₄. При нагревании образца до 500° из него выделились CO ($9 \cdot 10^{-4}\%$ С),

CO₂ ($< 1 \cdot 10^{-4}\%$ C), а также CH₄ и др. Другой образец пиролизовался до плавления при 1150°, отмечены CO ($156 \cdot 10^{-4}\%$ C), CO₂ ($12 \cdot 10^{-4}\%$ C), CH₄, следовые количества HCN, H₂S, SO₂, Ne, Ar, C₂H₂, N₂, O₂, причем азота содержалось в 20 раз больше, чем кислорода. Сходным образом пиролизовались образцы реголита весом 100—200 мг из двух колонок (12025 и 12028) при нагревании до 500°. В них также отмечены CO, CO₂, SO₂, углеводороды. Отмечено, что образцы были в некоторой степени контаминированы тефлоном. Общего органического вещества найдено $0,2 \cdot 10^{-4}$ — $2,2 \cdot 10^{-4}\%$, но содержание органических веществ, присущих образцам, оценено на уровне $0,1 \cdot 10^{-4}\%$. Р. Марфи проводил испарение летучих компонентов при нагревании образца реголита 10086 весом 0,4 г до 400° также непосредственно в ионном источнике масс-спектрометра. По масс-спектрам отмечены CO₂, SO, SO₂, H₂S, COS, CS₂, элементарная сера, вероятно присущие образцу. Содержание органических веществ определено $0,25 \cdot 10^{-4}$ — $2,5 \cdot 10^{-4}\%$. Они представлены главным образом углеводородами — насыщенными и ненасыщенными, содержащими до 9 атомов углерода в цепи. Р. Марфи считает, что это, вероятно, следы лабораторной контаминации. Из отмеченных наиболее интенсивны ионы C₄H₇, C₄H₉, CO₂, C₂H₅O, SO, SO₂, H₂S.

Ряд лунных образцов, доставленных «Аполлоном-12», Г. Прети, Р. К. Марфи и К. Бимен изучали при нагревании в масс-спектрометре до 900°. Образцы были отобраны с поверхности вблизи лунной кабины, а также в удалении от нее — образцы реголита из контейнера, из колонки с трех глубин (10, 21 и 30 см), из траншеи на валу кратера Хэд, из кратера Бенч. Некоторые образцы были в той или иной степени контаминированы. В частности, в образце из контейнера определено наибольшее количество органических соединений, в образцах из кратеров Хэд и Бенч найдено относительно большое содержание углеводородов. Присущих органических молекул оценено на уровне $10^{-7}\%$. В образцах из колонки отмечено наибольшее содержание CO вблизи поверхности и увеличение концентрации органических молекул с глубиной; причем их выход наибольший при температурах 275—525°. Определены бензол C₆H₆, толуол C₇H₈, пиридин C₅H₅N, метилпиридин C₆H₇N, бензонитрил C₇H₅N, фенол C₆H₅O и др. (табл. 19), а также SO₂, H₂S, NH₃, HCN, CO, CO₂, CH₄.

Таблица 19

Многоатомные соединения, найденные масс-спектрометрическим методом при пиролизе образцов реголита из колонки 12028 (по Г. Прсти)

Отношение массы к заряду, m/e	Соединение	Глубина		
		10 см	21 см	30 см
70	C_4H_6O		+	
72	C_4H_8O		+	
73	C_3H_7NO		+++	++
75	C_3H_7S		+	+
77	C_6H_5	+	++	+++
78	C_6H_6	+++	+++	
79	C_6H_5N		+	++
91	C_7H_7	++	++	++
92	C_7H_8		+	++
93	C_6H_7N			++
94	C_6H_6O			+
103	C_7H_5N			++

Образец реголита, доставленного «Аполлоном-11», весом 25 мг С. Р. Липский нагревал в кварцевой трубке, соединенной с газовым хроматографом и пламенно-ионизационным детектором. При нагревании до 150°, 250° и 500° органические соединения не обнаружены. Другой образец весом 10 мг нагревался от 50 до 250° с записью масс-спектров. Преобладающие соединения представлены H_2O , N_2 , O_2 и CO_2 . Низкомолекулярные углеводороды зафиксированы в виде слабых пиков.

Чистые, неконтаминированные образцы реголита, доставленные «Аполлоном-11», весом 100—450 мг Дж. Оро исследовал методом прямого пиролиза в масс-спектрометре при программированном нагревании до плавления реголита при 1130°. Отмечены He, Ne, Ar, CO, CO_2 , N_2 и др. Их выход зависел от температуры. Например, инертные газы были особенно отчетливы при 200—400°, CO преобладал при высоких температурах. Другие образцы реголита пиролизовались в пиролитической ячейке, соединенной с газовым хроматографом — масс-спектрометром. Результаты были сходные. При нагревании до 200° не наблюдалось значительного количества газов. При нагревании

от 300 до 500° выделялся в основном CO₂ (и часть CO), а при нагревании 600—750° преобладал CO, выделялся также CO₂, с соотношением при 750° CO/CO₂ ≈ 10. Метан отмечался при нагревании выше 400°. Углерод двух образцов реголита весом 10 г был переведен в CO₂ нагреванием до 800—900°. Количество углерода в виде CO₂ было 42·10⁻⁴ и 100·10⁻⁴%. По изотопному составу углерод был утяжелен по сравнению со стандартом (PDB), величины δC¹³ составляли +1,3 и +1,85%. Изотопный состав свидетельствовал о том, что это присуще лунный углерод. Близкие данные получил Дж. Оро и при пиролизе образцов реголита, доставленных «Аполлоном-12». При нагревании образца 12023.9 в вакууме при 750° и масс-спектрометрическом анализе из образца выделены газы при следующем содержании (10⁻⁴%): CO 137, H₂ 44,3, H₂O 26,8, CO₂ 17,2, N₂ 16,2, He 4,14, а также CH₄, C₂H₆, C₂H₄. Небольшие образцы реголита нагревались до 1400°, в них найдены летучие компоненты — H₂, He, H₂O, N₂, CO, H₂S, CO₂ и SO₂.

П. И. Эбел исследовал образец реголита, доставленного «Аполлоном-11», весом 2,6 г, методом ступенчатого пиролиза при нагревании в масс-спектрометре от 130 до 900°. Отмечено непрерывное выделение CO и CO₂, особенно при более высоких температурах. Метан выделялся в области 130—700°, с максимумом при 300—600°. Присутствовали ненасыщенные и ароматические углеводороды. C₂H₄ выделялся при температурах 130—600°, C₄H₈ — при 130—600°, C₆H₆ — особенно при 300—700° и т. д., до C₈H₁₂. Кроме того, отмечены C₄H₄, H₂, N₂, O₂, редкие газы. Общее содержание углерода в составе низкомолекулярных продуктов пиролиза 150·10⁻⁴%. Сходные соединения раньше были выделены при нагревании углистых хондритов. Кроме того, CH₄, CO₂ и CO были выделены и из земных изверженных пород при их нагревании до 1000°С. П. И. Эбел считает, что идентифицированные продукты пиролиза присущи лунному веществу.

При пиролизе образца реголита 10086.3 в вакууме при температурах 150—250, 250—500, 500—750° и изучении продуктов пиролиза методами масс-спектрометрии и газовой хроматографии С. Чанг и С. Поннамперума определили общее содержание углерода 157·10⁻⁴%. При пиролизе выделялся главным образом CO, а также CO₂ (при температурах 250—750°), следы углеводородов ряда

Таблица 20

Соотношение соединений углерода, выделенных при пиролизе реголита, доставленного «Аполлоном-12»
(по С. Чангу, 1971)

Формы углерода	Температура пиролиза, °C		
	500	750	1100
CO	37	>98	94
CO ₂	45	<0,08	6
CH ₄	18	<0,7	0
Общий C, 10 ⁻⁴ %	25	4,0	61
δC ¹³ , ‰	-1,0	+1,36	+1,26

C₁ — C₄. При ступенчатом нагревании до 1100° в вакууме образца реголита, доставленного «Аполлоном-12», они определили при 500° следующую относительную распространенность газов: CO₂ > CO > CH₄, а при высокотемпературном нагревании — CO ≫ CO₂ > CH₄. Метан исчезал при нагревании выше 750°. Углерод в различных температурных фракциях по изотопному составу отличался (табл. 20).

Образцы реголита, доставленные «Аполлоном-12, -14», весом 20—50 мг П. Т. Холланд пиролизировал в ионном источнике масс-спектрометра при температурах 30—1300°. Главные продукты пиролиза H₂O, CO, CO₂, N₂. Причем CO и CO₂ составляют более 95% общего углерода. В области 300—800° наблюдались также метан, Ne²⁰, Ar³⁶, Ar⁴⁰, бензол, при содержании метана и бензола, соответственно, 2·10⁻⁴ и 0,2·10⁻⁴%. Результаты пиролиза показали, что углерод находится в основном в нелетучей форме и выделяется в виде CO с двумя температурными максимумами в высокотемпературной области. В реголите отмечено загрязнение тефлоном при содержании 3·10⁻⁴—5·10⁻⁴%.

При пиролизе до 1400° C в вакууме образцов реголита, доставленных «Аполлоном-14 и -15», Э. Гибсон и Г. Мур отметили выделение H₂, He, H₂O, CO, N₂, O₂, H₂S, CO₂, SO₂. Б. Симонейт подробно исследовал методом вакуумного пиролиза при 1400° образцы реголита, доставленные «Аполлоном-16». В образце реголита 61221.7 из вала кратера

Таблица 21

Содержание углерода в соединениях, выделенных при пиролизе лунных образцов, доставленных «Аполлоном-14 и -16» (10^{-4} %)

Станция	«Аполлон-14» (по Б. Надь, 1972)			«Аполлон-16» (по Д. Модзелески, 1973)			
№ образца	14240	14003.55	14421.9	61221.2		68841.25	
Температура пиролиза, °C	500+1000			500	1000	500	1000
CO	82,1	72,1	88,6	0	5,7	0	45,7
CO ₂	31,2	28,3	22,6	7,9	10,4	8,5	1,8
CH ₄	1,0	1,4	2,0	0,1	0,4	0,16	0,8
Общий C	114,3	101,8	113,2	24,5		57,0	

Пламя найдены летучие компоненты H₂O, CO, CO₂, а также небольшое количество углеводородов, HCN, NO, SO₂, Ne²⁰, Ar³⁶ и др. В образцах 63 320.14 и 63 340.14 главные летучие соединения — H₂O, CO, CO₂, N₂, отмечены также низкомолекулярные углеводороды, HCN, NO, H₂S, SO₂, C₂H₆, Ar³⁶, Ar⁴⁰. При пиролизе земного базальта с Гавайских островов, проведенном для сравнения, выделены H₂O, CO, CO₂, O₂, SO₂, CH₄. Из метеорита Альенде при пиролизе до 1400° выделены главным образом H₂O, CO₂, CO, N₂; метан CH₄ и C₂H₄ наблюдались при нагревании ~600°; кроме того, при нагревании до 620° отмечены также O₂, C₂H₆, SO₂, CS₂.

Б. Надь и Д. Модзелески с соавторами пиролизировали образцы лунного реголита в вакууме при 500 и 1000° после предварительного дегазирования при 150°. Они тоже отметили преимущественное выделение CO при пиролизе. Например, при пиролизе до 1000° образца реголита 14 003.55, доставленного «Аполлоном-14», найдено следующее соотношение газов (в %): CO—70,8, CO₂—27,8, CH₄—1,4 при общем содержании углерода 101,8·10⁻⁴%. Содержание CH₄ в трех образцах реголита «Аполлона-14» было (1—2)·10⁻⁴%, в образцах реголита «Аполлона-16» (0,5—1)·10⁻⁴ (табл. 21).

Кроме пиролиза в вакууме, Б. Надь проводил пиролиз лунных образцов в пиролитической ячейке в гелиевой атмосфере. При 700° пиролизировались образцы реголита

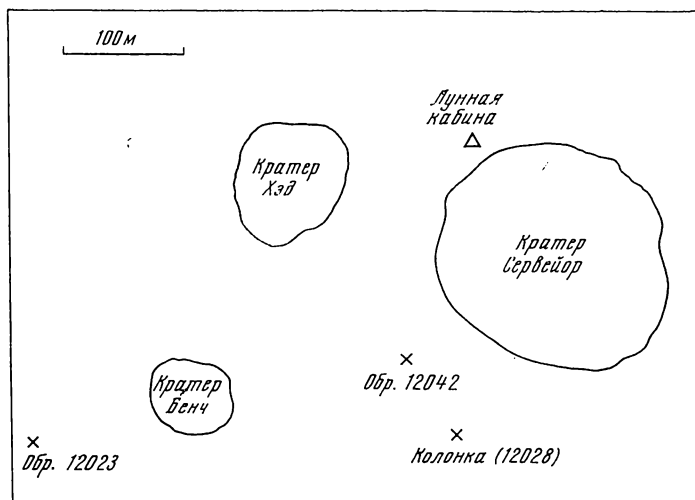


Рис. 21. Места отбора некоторых образцов лунного реголита из района Оксана Бурь (по Б. Надь).

10 086, необработанного (623,4 мг) и предварительно экстрагированного органическим растворителем (717,2 мг), и образец брекчии 10 002.54 весом 675,8 мг. Распределение продуктов пиролиза ($< 100 \cdot 10^{-4} \%$) во всех образцах было очень сходным. Углеводороды представлены главным образом метаном; присутствуют бензол, толуол, CO_2 , насыщенные низкомолекулярные углеводороды, алкилбензолы, тиофен, метилтиофены, индол, метилиндо́л, нафталин, метилнафталин, дифенил, стирол, метилстирол. В гелиевой среде Б. Надь пиролизировал ряд образцов, доставленных «Аполлоном-12», — образцы реголита с лунной поверхности, со дна 15-сантиметровой траншеи, из колонки с глубины 9 и 39 см и др. Они были отобраны на удалении от места посадки лунной кабины (рис. 21). В продуктах пиролиза присутствуют CO , CO_2 , CH_4 , H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_4H_6 , C_4H_8 , C_5H_6 , C_5H_8 , бензол, тиофен, толуол, C_2 -алкилбензол, *о*-ксилол, стирол, индол, нафталин, метилнафталин, дифенил (рис. 22), т. е. те же углеводороды, что и в образцах реголита, доставленных «Аполлоном-11». Сходные результаты получил Г. Прети при пиролизе в гелиевой среде образцов реголита «Аполлона-12».

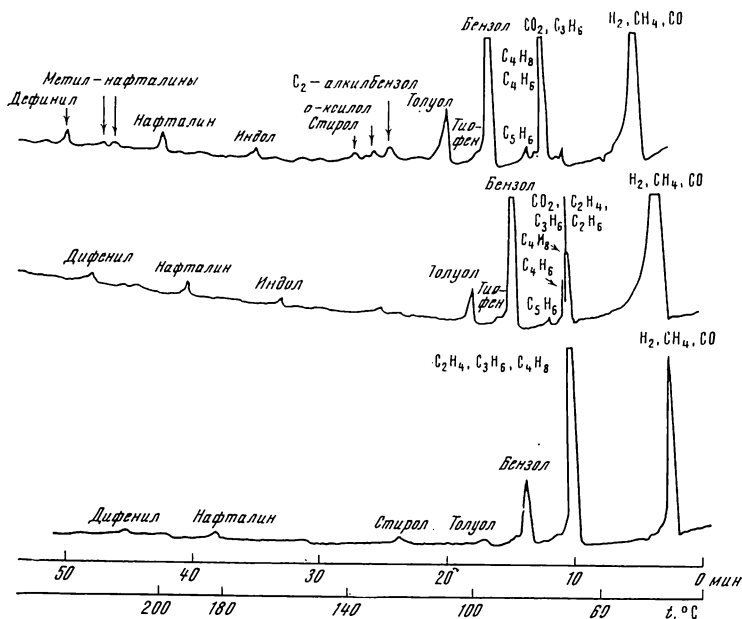


Рис. 22. Газовые хроматограммы продуктов пиролиза образцов лунного реголита из Океана Бурь (по Б. Надь):

а — реголит с лунной поверхности, образец 12042.13; б — образец 12023.8 из траншеи; в — образец 12028.207 из колонки с глубины 39 см.

Кроме пиролиза необработанных образцов реголита, проводились опыты по нагреванию образцов, предварительно обработанных кислотами. Остаток (весом 22 мг) после обработки плавиковой кислотой образца реголита, доставленного «Аполлоном-11», А. Л. Бурлингейм пиролизировал при 150, 500 и 1150°. Масс-спектрометрический анализ показал преобладание CO, содержание углерода в составе CO было $18 \cdot 10^{-4}$, $13 \cdot 10^{-4}$, и $88 \cdot 10^{-4}\%$, всего $119 \cdot 10^{-4}\%$. Наблюдались CO₂, H₂O, SiF₄. При нагревании выше 500° отмечен бензол. В процессе нагревания земного графита до 1150° выделилось меньше 3% CO.

Таким образом, при пиролизе лунных образцов выделяются газы, представленные главным образом CO, а также CO₂, CH₄. Из ароматических углеводородов наиболее распространен бензол.

Дробление в вакууме

Образцы реголита 10 086 — необработанный образец весом 200 мг и образец, деминерализованный обработкой соляной кислотой, — П. И. Эбел распылял в вакууме шаровой мельницы при комнатной температуре и после дегазации при 150°. Газы, выделяющиеся при распылении и дроблении образцов, анализировались масс-спектрометрическим методом. В газах преобладал метан CH_4 ($1 \cdot 10^{-4}\%$) и отмечен этан C_2H_6 ($0,1 \cdot 10^{-4}\%$). Выделены, кроме того, C_3H_8 , CO , водород, редкие газы He, Ne, Ar, причем содержание Ar^{36} составляло $9 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{г}$. Метан также найден в образцах каменных метеоритов Капоета и Альенде, исследованных для сравнения. При дроблении в вакууме образца брекчии (10 009) С. Чанг определил углеводороды ряда C_1 — C_3 и CO_2 . Преобладание метана в газах отмечено также при дроблении образцов реголита 12 023 и внутренней части базальта 12 022. Следовательно, при дроблении образцов в вакууме из них выделяются углеводородные газы.

ГЛАВНЫЕ ФОРМЫ УГЛЕРОДА

Многочисленными экспериментами, описанными выше, было показано, что при нагревании или обработке кислотами лунных образцов из них выделяются газообразные соединения, представленные главным образом окисью и двуокисью углерода и метаном. В какой форме первоначально присутствуют углеродистые соединения?

Окись и двуокись углерода

В процессе пиролиза образцов лунного реголита CO , являющаяся главной формой углерода, выделяется в основном при нагревании до 900° С и выше. Основная часть CO_2 выделяется при этом в сравнительно низкотемпературной области. Значительная часть углерода в форме CO выделяется и при кислотной обработке реголита. Так, А. Л. Бурглингейм определил для реголита «Аполлона-11» при его обработке плавиковой кислотой $66 \cdot 10^{-4}\%$ углерода в форме CO . Окись и двуокись углерода частично может первоначально находиться в виде газа в составе газовых пузырьков. Однако число этих пузырьков и парциальное давление CO в них недостаточно, чтобы объяснить высокое содержа-

ние СО в образцах. А. Л. Бурлингейм предположил, что значительная часть СО, высвобождаемая из реголита его обработкой HF-кислотой, должна присутствовать в иной форме, чем газ, например в составе карбониллов $\text{Fe}(\text{CO})_4$ и др. По мнению С. Чанга, главная часть С в лунном веществе представлена в составе негидролизующих карбидов или в виде элементарного углерода. В процессе пиролиза С мог окисляться с образованием СО. При этом нагревании возможны многочисленные реакции, связанные как с разложением углеродсодержащих соединений, так и с синтезом новых соединений. Например, Б. Надь, который специально изучил процесс пиролиза бензола C_6H_6 при 600°C в гелиевой среде при атмосферном давлении, показал, что в продуктах пиролиза присутствуют небольшие количества дифенила, нафталина. При дальнейшем нагревании до 900° образуются многие продукты синтеза. Синтез углеводов возможен и непосредственно при прямом участии СО в присутствии водорода по реакции Фишера — Тропша. Главная форма углерода, присутствующая первоначально в лунном веществе, которая при пиролизе реголита выделяется в виде СО и CO_2 , окончательно пока не выяснена.

Метан и карбиды

Углеводородные газы, выделяющиеся при пиролизе, кислотной обработке образцов лунного реголита, а также при их дроблении в вакууме, представлены углеводородами ряда $\text{C}_1—\text{C}_4$, главным образом метаном, этаном, C_2H_4 . Природа этих газов подробно исследовалась в экспериментах, когда разложение образцов осуществлялось дейтерированными кислотами, при этом найдено, что часть метана, как главного компонента углеводородов, присутствует первоначально в виде газа, а его другая часть является результатом гидролиза карбидов, присутствующих в реголите.

П. И. Эбел с соавторами проводили эксперименты по дроблению в присутствии дейтерированной воды D_2O образца реголита 10086.19. Метан, выделившийся при дроблении, представлен ($>95\%$) CH_4 , CD_4 , CD_3H ; этан ($75—80\%$) представлен C_2H_6 , C_2D_6 , $\text{C}_2\text{D}_5\text{H}$. Отмечены также редкие газы He , Ne , Ar . Другая часть образца обрабатывалась в течение 16 часов дейтерированной соляной кислотой DCl . При этом только 15% метана выделилось в виде CH_4 , почти весь остаток представлен CD_4 . Этан на 30% представ-

Таблица 22

Формы метана, выделенные из лунных образцов при гидролизе DCl
(по Ц. Х. Кадогану, 1972)

Образец	Общий углерод, 10^{-4} %	CH_4 , мкг/г	CD_4 , мкг/г	CD_4/CH_4
Реголит, «Аполлон-11» (обр. 10086)	140, 225	4,2—4,9	17,5—18,7	3,7—4,5
Реголит, «Аполлон-12»	23—160	0,96—2,6	1,4—10	3,4—4,8
Реголит, «Аполлон-14»	42—186	0,5—4	1,1—13	2,2—3,8
Реголит, «Аполлон-15»	90—160	3,2—5,1	9,5—23,5	3—5,1
Брекчия, «Аполлон-11» (обр. 10059)		5—5,2	17—20	3,3—4
Брекчия, «Аполлон-14»	19,3—80,5	$<0,04$	0,15—9,9	3

лен C_2H_6 , его остальная часть — C_2D_6 или $\text{C}_2\text{D}_5\text{H}$. При обработке DCl образца метеоритного когенита выделившийся метан был представлен CD_4 (95%) и CD_3H (5%).

Образцы брекчии 10009 и реголита 12023 С. Чанг с соавторами гидролизовали при нагревании в дейтерированной DCl в растворе D_2O . При этом выделялся метан в виде CH_4 и дейтерированный CD_4 , причем в образце реголита метан в виде CH_4 представлен 31%, а CHD_3 и CD_4 — 69%. Образцы реголита и брекчии дробились также в присутствии D_2O . Выделялся недейтерированный метан, а также CHD_3 и CD_4 . Содержание присущего метана оценено приблизительно в $2 \cdot 10^{-4}\%$. Содержание углерода в составе присущего CH_4 составляло $0,48 \cdot 10^{-4}$ — $4 \cdot 10^{-4}\%$, в среднем $2 \cdot 10^{-4}\%$, а в составе карбида $6,7 \cdot 10^{-4}\%$ в реголите 12023 и $18,1 \cdot 10^{-4}\%$ в брекчии 10009. Карбид по изотопному составу отличался от метеоритного когенита, для него величина δC^{13} составляла +1,4%.

Величины соотношения форм метана CD_4/CH_4 , выделенных при обработке различных лунных образцов раствором DCl — кислоты в D_2O , приведены в табл. 22.

Д. Эглинтон и П. Холланд с соавторами также гидролизовали образцы реголита «Аполлона-11 и -12» дейтерированными соляной и плавиковой кислотами, выделенные газы анализировались методами масс-спектрометрии и газовой хроматографии. Газы были представлены дейтери-

Таблица 23

Количество углерода, выделенного в составе углеводородных газов из образцов лунного реголита, обработанных DF- или DCl-кислотами, в мг/г

Компоненты	«Аполлон-11» (по Д. Эглинтону, 1971)		«Аполлон-12», (по П. Холланду, 1972)	
	10086, гидролиз DF	10086, гидролиз DCl	12001, гидролиз DF	12042, гидролиз DF
CH ₄	5,2	5,1	1,2	1
CD ₃ H	—	—	0,3	0,2
CD ₄	19	22	2,3	2,0
C ₂ H ₆	0,9	0,16	0,034	0,04
C ₂ D ₆	3,6	1,2	0,36	0,26
C ₂ D ₂	—	—	0,07	0,12
C ₂ D ₄	—	—	0,5	0,29
Углеводороды ряда C ₃	—	—	0,06	0,06
Углеводороды ряда C ₄	—	—	0,08	0,08

рованными и недеитерированными формами метана, этана, этилена, ацетилена и др. Углеводороды ряда C₁—C₂ представлены в табл. 23. В образцах, доставленных «Аполлоном-11», присущих форм CH₄ и C₂H₆ найдено в 4 раза меньше, чем CD₄ и C₂D₆, образованных при гидролизе карбидов. В образцах реголита, доставленных «Аполлоном-12», присущих CH₄, C₂H₆ и карбидов наблюдалось меньше. При кислотной обработке образца базальта 12022 выделены CH₄ и C₂H₆, а также небольшие количества ацетилена и этилена. Причем в базальтовом образце CH₄ содержалось больше, чем в образцах реголита 12032 и 12033. Дейтерированные углеводороды CD₄ и C₂D₆ при этом не отмечены, т. е. карбиды в базальте в заметном количестве не присутствуют, а найденные углеводороды, составляющие 2% от общего углерода в образце, — присущие газы. Кроме этих газов, в образцах реголита и во внутренних частях пород отмечены CO₂ (до 50 · 10⁻⁴% C), CO (< 2 · 10⁻⁴% C), N₂. При сходной обработке метеоритного когенита DCl кислотой выделенные углеводороды почти полностью были представлены дейтерированными видами. Среди них не наблюдался ацетилен.

Таблица 24

Газы, выделенные при гидролизе DF и вакуумном пиролизе из лунных образцов, доставленных «Аполлоном-14, -15, -16», в наномолях/г (по П. Т. Холланду, '1972, 1973)

Компоненты	«Аполлон-14»			«Аполлон-15»		«Аполлон-16»	
	реголит 14148.3 (верх тран- шей)	реголит 14149.25 (дно тран- шей)	брекчия 14047.16 (внутренняя часть)	реголит 15021.37	реголит 61221.7	реголит 61241.8	
CH ₄ CD ₄ +CD ₃ H C ₂ H ₆ Дейтерированные углеводороды ряда C ₂ ряда C ₃ ряда C ₄ HCN + DCN D ₂ S + HDS CS ₂ PD ₃ Ne ²⁰ Ar ³⁶ Общий C (10-4%)	290	150	98	155	46	86	
	908	410	448	746	27	162	
	3,5	1,2	1,1	2,2	4,24	5,9	
	158	20	38	82	10,4	25,8	
	61	2	8	15	—	7,1	
	3,8	2	1,1	3	—	—	
	50	13	24	26	41,1	51	
	760	3700	12300	14400	493	362	
	110	4	11	6,9	0,67	0,36	
	—	—	150	10,7	0,36	4,93	
	40	38	24	45	5,58	23,7	
	25	12	10	9,6	3,89	7,24	
160	135	140	140	67	103		

Сходные изучения других лунных образцов подтвердили, что часть метана находится первоначально в виде газа. Например, для образца реголита 14240.5, взятого с глубины 30 см и доставленного экипажем «Аполлона-14» в контейнере, сохраняющем обстановку взятия пробы на месте, найдено содержание присущего CH_4 $3 \cdot 10^{-4}\%$ при общем содержании углерода $250 \cdot 10^{-4}\%$. Этот образец был разделен на пять фракций по размеру зерен (от > 420 до $< 37\text{мк}$), фракции обрабатывались DF. Содержание метана коррелировалось с размером зерен и увеличивалось в 20 раз в самой тонкой фракции. Для образцов реголита, отобранных из траншеи, содержание недеитерированных и дейтерированных углеводородов было больше в образцах из верха траншеи, а в образце брекчии 14047 было примерно таким же, как в образце реголита со дна траншеи (табл. 24). Такие же газообразные углеводороды найдены и при обработке DF кислотой образцов реголита, доставленных «Аполлоном-15 и -16» (см. табл. 24).

Следовательно, метан, этан и другие газообразные углеводороды, выделяющиеся из лунных образцов, представлены как присущими видами, так и образованы при разложении карбидов.

БИОХИМИЧЕСКИ ВАЖНЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Аминокислоты

В образцах лунного реголита проводились тщательные поиски аминокислот, находящихся в свободном состоянии (в водных экстрактах) и в связанном состоянии (после солянокислого гидролиза), методами ионообменной хроматографии и с использованием аминокислотного анализатора с чувствительностью $1 \cdot 10^{-7}\%$. Они присутствуют во всех исследованных образцах реголита, хотя при первых анализах реголита результаты не были однозначными из-за очень небольшого содержания аминокислот.

С. Поннамперума при использовании ионообменной хроматографии не нашел аминокислот в образцах реголита, доставленного «Аполлоном-11 и -12». Д. Оро также не нашел свободных аминокислот, но обнаружил связанные аминокислоты в следовых количествах в реголите весом 9,2 г, доставленном «Аполлоном-12». Впоследствии С. Поннамперума отметил следующие аминокислоты в образцах

реголита «Аполлона-12, -14, -15, -16»: глицин, аланин, аспарагиновую, глутаминовую кислоты, серин и иногда — треонин при их общем содержании $(4-34) \cdot 10^{-7}\%$.

В образцах реголита весом 32 г, доставленного «Аполлоном-11», в водных экстрактах Б. Надь нашел главным образом глицин и аланин. После солянокислого гидролиза отмечено преобладание глицина, аланина, этаноламина; кроме того, присутствовали аспарагиновая кислота, серин, треонин. В образце реголита «Аполлона-12» определены (при содержании на уровне $10^{-7}\%$) глицин, аланин, аспарагиновая кислота, серин, треонин, орнитин. В образце дунита, который был подвергнут экспериментальной обработке продуктами сгорания ракетного топлива, найдено иное распределение аминокислот. Это дает основание предполагать, что аминокислоты присущи лунному реголиту. Б. Надь считает (устное сообщение автору этих строк в 1973 г.), что аминокислоты образовались либо в результате воздействия компонентов солнечного ветра, либо с участием карбидно-углерода.

Особенно подробное изучение аминокислот в образцах лунного реголита провела группа С. Фокса в Майями. В табл. 25 приведено, по данным С. Фокса, содержание аминокислот в образцах лунного реголита, доставленных из разных районов Луны. Образцы лунного реголита весом 10 и 15 г из Моря Спокойствия экстрагировались очищенной водой с последующим гидролизом соляной кислотой. Гидролизаты изучались на аминокислотном анализаторе. В них найдены аминокислоты при следующих содержаниях (в наномолях): глицин — 0,28, аланин — 0,14, глутаминовая кислота — 0,05, аспарагиновая кислота — 0,03, серин — 0,05, треонин — 0,01, а также α , β -диаминопропионовая кислота. В образце реголита весом 1,7 г аминокислот соответственно содержалось: глицина — 0,48, аланина — 0,23, глутаминовой кислоты — 0,09, аспарагиновой кислоты — 0,05, серина — 0,09, треонина — 0,02. Преобладал глицин (рис. 23). Общее содержание аминокислот в образцах $(37-53) \cdot 10^{-7}\%$. Интересно, что в водных экстрактах без последующего гидролиза, т. е. свободных аминокислот найдено значительно меньше. Поэтому считают, что аминокислоты в лунном реголите находятся в полимеризованном состоянии. В продуктах окисления диметилгидразина в азотной кислоте аминокислоты обнаружены в следовых количествах. В образцах реголита

Таблица 25

Содержание аминокислот в образцах лунного реголита
(по С. Фоксу)

Станция	Район	№ образца	Глицин	Аланин	Глутами- новая кислота	Аспара- гиновая кислота	Серин	Треонин	Валин	Лейцин	Изолей- цин
<i>в гидрוליатах образцов (мольные %)</i>											
«Аполлон-11»	Моря Спокой- ствия	10086 анализ 1	50	25	9	5	9	2	—	—	—
	»	2	52	19	11	5	10	3	<1	<1	<1
«Аполлон-12»	Океан Бурь	12033 (траншейный)	37	12	20	<1	<1	<1	<1	3	<1
		12001 (поверхностный)	70	3	6	2	3	—	<1	<1	<1
«Аполлон-14»	Фра-Мауро	14003	62	20	12	2	4	1	—	—	—
		14163	47	26	20	2	6	1	—	—	—
		14238	57	7	13	7	10	2	—	—	1
«Аполлон-15»	Хэдли	15012	61	6	16	6	6	2	—	3	—
«Аполлон-16»	Декарт	66041	56	6	19	5	8	1	—	5	—
<i>в образцах (наномоли/г)</i>											
«Аполлон-15»	Хэдли	15013,5	0,080	0,008	0,010	0,006	0,006	0,001	<0,001	<0,001	<0,001
		15012,17	0,042	0,004	0,012	0,004	0,004	0,001	—	—	—
«Аполлон-16»	Декарт	66041,25	0,120	0,012	0,030	0,008	0,012	0,002	0,004	0,004	0,004

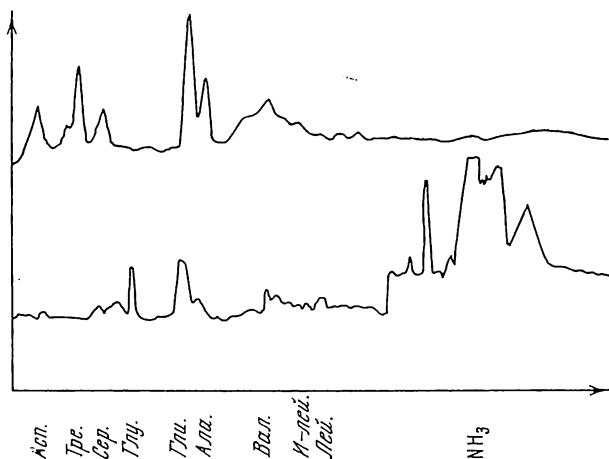


Рис. 23. Хроматограммы аминокислот гидролизатов водных экстрактов из образцов реголита 10086 (а) и 12033 (б) (по С. Фоксу).

«Аполлона-12», аминокислот было: $69 \cdot 10^{-7}\%$ в реголите с поверхности и $19 \cdot 10^{-7}\%$ в реголите из траншеи. Наиболее распространен глицин, присутствуют аланин, глутаминовая кислота, серин, аспарагиновая кислота, треонин, в следовых количествах — валин, лейцин, изолейцин, тирозин, фенилаланин (см. рис. 35). Аминокислоты лизин, аргинин, гистидин, характерные для продуктов земной контаминации, в образцах отсутствуют. В трех образцах реголита «Аполлона-14» аминокислоты представлены (по степени уменьшения распространенности) глицином, аланином, глутаминовой кислотой, серином, аспарагиновой кислотой, треонином, а в одном образце — также лейцином и изолейцином. Содержание глицина в реголите «Аполлона-14», как определил Ч. Герке, составляло 3—4 нанограммов/г, аланина < 1 нг/г и др. Величины соотношения глицина, аланина, глутаминовой кислоты, по данным С. Фокса, очень близки к величинам их соотношения в метеорите — углистом хондрите Мурчисон. Эти же аминокислоты найдены и в образцах реголита, доставленных «Аполлоном-15 и -16». В образце 15012, отобранном на значительном расстоянии от лунной кабины, аминокислот содержится (в наномолях/г): глицин — 0,042, глутаминовая кислота — 0,012, аланин — 0,004, серин — 0,004, аспарагиновая кислота — 0,004,

треонин — 0,001, всего 0,067. Общее содержание аминокислот в различных образцах лунного реголита составляет 20—70 $\mu\text{г/г}$. С. Фокс с сотрудниками считает, что органические соединения, гидролизуемые до аминокислот, в лунных образцах могут быть продуктами реакций между компонентами солнечного ветра либо это межпланетное вещество.

Порфирины

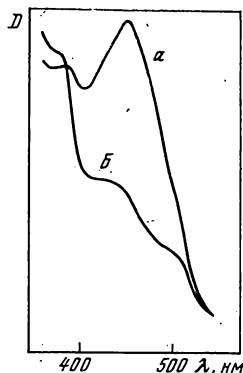
Порфирины также являются биохимически важными органическими соединениями. Поэтому поиски порфиринов в лунных образцах представляют значительный интерес.

В доставленных на Землю лунных образцах реголита поиски порфиринов проводили группа Дж. Ро и группа С. Поннамперума. Работа велась в очень чистых условиях и возможность заноса земных порфириновых соединений в лунное вещество в процессе анализа была очень малой. Только в некоторых образцах в небольших количествах порфирины были отмечены.

С. Поннамперума проводил поиск порфиринов в образцах лунного реголита весом 54,6 и 10 г из Моря Спокойствия. Образцы экстрагировались органическими растворителями, экстракты обрабатывались метансульфоновой кислотой для демедаллизации порфириновых комплексов и изучались флуоресцентной спектрометрией. При флуоресценции в области 600 нм на спектрах отмечена полоса возбуждения при 390 нм и отчетливо проявилась полоса Сорé при 412 нм , характеризующая порфирины (рис. 24). Содержание порфиринов было оценено в 0,1 $\mu\text{г/г}$ реголита. В метеорите Альенде и в образце песка, предварительно прокаленного до 1000°С, которые исследовались для сравнения, порфирины не найдены. Но они были обнаружены в продуктах сгорания ракетного топлива. Возникло предположение, что в образцах реголита, отобранных экспедицией «Аполлона-11» в непосредственной близости от лунной кабины, порфирины могли синтезироваться во время посадки лунного отсека. Действительно, в образце дунита, обработанного продуктами сгорания ракетного топлива, были найдены порфирины. В лунных образцах из Океана Бурь поиски порфиринов проводились в реголите, отобранном вблизи лунной кабины, и в реголите, отобранном на расстоянии 500 м от нее из траншеи глубиной 20 см. Пор-

фиринно-подобные пигменты вначале были обнаружены при содержании $0,05 \text{ нг/г}$, но в дальнейшем верхний предел их содержания определен в $0,005 \text{ нг/г}$. В образце реголита весом $4,5 \text{ г}$, отобранном из района Фра Мауро на расстоянии 15 м от лунной кабины, порфирины не обнаружены при чувствительности анализа $0,01 \text{ нг/г}$.

Рис. 24. Спектры флуоресценции экстрактов лунного реголита, доставленного «Аполлоном-11» (а) и земного дунгита, обработанного продуктами сгорания ракетного топлива (по Г. В. Ходжесу).



Два других образца реголита весом $5,2$ и $7,9 \text{ г}$ из Моря Спокойствия исследовал Дж. Ро. Образцы экстрагировались органическими растворителями, экстракты после деме­таллизации порфириновых комплексов изучались методами спектрофотометрии и спектрофотофлуоресценции. При чувствительности $0,01 \text{ нг/г}$ порфирины не обнаруживались. Сходным образом исследовались образцы лунного реголита весом 15 г из Океана Бурь и из района Фра Мауро. Методом флуорометрии при чувствительности $0,002 \text{ нг/г}$ порфирины также не найдены. Они не были отмечены и при изучении колонки реголита из района Хэдли и образца реголита с поверхности из района Декарт. Однако в образцах реголита отмечено другое флуоресцирующее вещество. В реголите «Аполлона-11» его содержалось $1 \cdot 10^{-6} \%$. Это вещество характеризуется поглощением при 310 и 350 нм с максимумом флуоресценции при 440 нм . Для образцов из Океана Бурь отмечена флуоресценция при $365\text{—}380 \text{ нм}$, в водной фазе — при 415 нм , а для образцов из Фра Мауро — слабое поглощение при 662 нм . В чистом порошке оптического кварца это вещество отсутствовало, но обнаруживалось в земных древних сланцах формации Ганфлинт. Предполагается, что это вещество — возможно, полицикличе-

ские ароматические соединения. В образце лунного реголита «Аполлона-15», контаминированного продуктами сгорания топлива, флуоресцирующие вещества найдены при содержании $1 \cdot 10^{-7} \%$.

Таким образом, порфирины в лунном реголите отсутствуют. Но они найдены в реголите, доставленном «Аполлоном-11». Если порфирины здесь и не являются первоначально лунными, их присутствие тем не менее очень интересно, поскольку это, возможно, результат нового высокотемпературного синтеза, имеющего космохимическое значение. Синтез порфиринов проходит достаточно легко, как показано экспериментально, с участием формальдегида и простых азотистых соединений, включая диметилгидразин, используемый в качестве ракетного топлива. Образование порфиринов отмечалось также при высокотемпературных плазменных реакциях из углекислоты и аммиака. В природных условиях подобный синтез порфиринов из простых соединений, содержащих углерод, водород, азот, может происходить, в частности, в условиях межзвездных пылевых облаков, где температура, как считают, достигает $10\,000^\circ$.

ОБЩИЙ СОСТАВ УГЛЕРОДИСТОГО ВЕЩЕСТВА

Общее содержание углерода в лунных образцах составляет в образцах реголита примерно $200 \cdot 10^{-4} \%$. Не исключено, что в некоторых лунных образцах часть углерода может быть результатом контаминации. Источники такой контаминации различные. Образцы, доставленные «Аполлоном-11», которые были собраны вблизи лунной кабины, могли в некоторой степени контаминироваться еще в лунных условиях продуктами сгорания ракетного топлива. Некоторые образцы, как было показано выше, могли загрязниться при их отборе и транспортировке. В наибольшей степени такой контаминации, как показали Р. Д. Джонсон и К. К. Дэвис, были подвержены некоторые образцы, доставленные «Аполлоном-11». В процессе анализа образцов контаминация была практически исключена, поскольку их анализ проводился в очень чистых условиях. Основная часть углерода присуща лунным образцам. В табл. 26 приведены те формы лунного углерода, которые, наиболее вероятно, присущи лунному веществу.

Таблица 26

Основные формы углерода в лунном веществе

Отмеченное соединение	Присущее вещество	Среднее содержание С, 10^{-4} %	Наблюдения под микроскопом
СО	возможно, карбонилы или негидролизуемые карбиды	60	—
СО ₂	газ	30	газовые пузырьки
	газ		» »
	возможно, карбонаты или негидролизуемые карбиды		микроскопически отмечен арагонит
СН ₄ и С ₂ Н ₆	гидролизуемые карбиды	20	микроскопически отмечен когенит
	газ	2	—
Высокомолекулярные алканы	органические соединения	до 0,01	—
Ароматические углеводороды (бензол и др.)	то же	до 0,01	—
Связанные аминокислоты	»	до 0,1	—
Свободный углерод	графит	—	отмечен микроскопически

Углерод находится в различных присущих формах. Его главная часть представлена негидролизуемыми видами, которые при пиролизе дают СО и СО₂. Часть этого углерода находится также в составе газовых пузырьков, неоднократно отмеченных при микроскопических исследованиях, особенно в образцах пород и стекол. Распространен также метан и в значительно меньшем количестве — этан и другие газообразные вещества как в виде присущих газов (они находятся в рассеянном состоянии в неорганической матрице), так и выделяющихся при гидролизе карбидов. В количествах, не превышающих $0,01 \cdot 10^{-4}$ %, в образцах реголита при их экстракции органическими растворителями найдены высокомолекулярные алканы, а также ароматические углеводороды. В образцах реголита определено более 6 аминокислот, которые находятся главным образом в связанном состоянии, т. е. они, вероятно, входят в состав более сложных предшественников. Микроскопически в образцах реголита изредка отмечался графит в виде отдельных мелких зерен. Не исключено, что в очень тонкодисперсной форме свободный углерод более распространен,

Глава 6

ИСТОЧНИКИ УГЛЕРОДА В ВЕЩЕСТВЕ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

ДЕГАЗАЦИЯ ЛУНЫ

Присутствие углерода в образцах лунного реголита и в породах показывает, что углерод в своей значительной части является присуще лунным, причем формы углерода образовались на ранней стадии развития Луны при ее дегазации. Следы дегазации сохранились в лунном веществе в виде пузырьков.

Пузырьки, заполненные флюидным веществом, подробно изучал Б. Надь. Исследование образцов реголита «Аполлона-11, -12, -14» методом сканирующей электронной микроскопии показало, что мелкие стеклянные каплевидные частицы содержат внутри полости. Такие же стеклянные частицы наблюдались на сколах брекчий. Микроскопические сферические поры были видны и на сколах образцов пород. Кроме того, в образцах реголита, доставленного «Аполлоном-14», при их изучении методом сканирующей электронной микроскопии отмечены мелкие хлопьевидные сморщенные частицы, напоминающие углеродистые полимеры. При нагревании до $800-850^{\circ}$ образцов реголита включения в частицах исчезали, а при нагревании до 1250° частицы полностью расплавились, причем расплав был слегка пузырчатым. Плавление происходило постепенно и лишь иногда частицы расплавились быстро при 1150° . Эксперименты показали, что некоторые из частиц содержат во включениях газообразные соединения.

Т. Веллман с помощью термодинамических подсчетов показал, что в процессе кристаллизации лунных пород газ, захваченный в виде газовых пузырьков, должен быть представлен главным образом СО. Следует отметить, что величина энергии связи для него наибольшая. Так, по подсчету Дж. Оро, величины энергии связи (ккал/моль) летучих компонентов для образцов «Аполлона-11» составляют: H_2O

2,5; CO_2 8,7; H_2 10; He 14,5; CO 37, и для образцов «Аполлона-12» соответственно: H_2O 3,6; CO_2 5,3; H_2 7,5; He 14; CO 29.

В лунных образцах сохранились лишь небольшие количества метана, воды, аммиака и других легколетучих соединений. Их основная часть при ранней дифференциации и дегазации Луны не была удержана Луной из-за малого гравитационного поля и улетучилась в космический вакуум.

Следовательно, в результате дегазации, происходившей на ранней стадии развития Луны, сохранившийся углерод оказался либо в захваченном состоянии в пузырьках в виде газа (CO , CO_2 , CH_4), либо вошел в состав относительно труднолетучих фаз (негидролизующиеся карбиды, карбонилы, карбонаты или полимерный углерод). Результатом дегазации может быть частично также присутствие других компонентов — H_2O , H_2 .

ПРИВНОС ВНЕЛУННОГО УГЛЕРОДА МЕТЕОРИТАМИ И КОМЕТАМИ

На поверхность Земли ежегодно выпадает 10^5 — 10^6 т космического вещества в виде метеоритов и космической пыли. Если на лунную поверхность выпадало сравнимое или даже меньшее количество космического вещества, то привнос углерода в его составе за всю историю Луны — величина, казалось бы, довольно большая, если бы не испарение значительной части метеорита при его сверхскоростном ударе.

На основании содержания ряда относительно легколетучих элементов-примесей в образцах лунного реголита Э. Андерс с соавторами оценили, что в составе лунного реголита в тонкодисперсном состоянии присутствует 1,5—2% вещества, подобного углистым хондритам. Эти метеориты обогащены углеродом (до 4,6%), который находится в них главным образом в составе высокомолекулярных органических соединений. Конечно, возможен привнос углерода на поверхность Луны и в составе метеоритов других типов. Наиболее распространены из каменных метеоритов обыкновенные хондриты. В них содержание углерода в среднем 0,08%.

При ударе метеорита воздействие ударных и отраженных волн и высоких температур, развивающихся при взрыве, обуславливает тонкое измельчение вещества метеорита

и испарение его большей части. Соответственно углеродистые вещества не сохраняются в своем первоначальном состоянии, а подвергаются процессу природного пиролиза с образованием главным образом простых соединений — CO , CO_2 , CH_4 и т. д. Не исключено, что часть метеоритного углерода при воздействии сверхвысоких динамических давлений может перекристаллизоваться до алмаза. Такая возможность нами была показана в 1973 г. экспериментально, когда из углеродистого вещества углистого хондрита Мигеи при динамических давлениях 500 кбар кристаллизовались алмазы с размерами микрокристаллов меньше 1 мк. Такие же микрокристаллы алмаза, возможно, присутствуют и в лунном реголите. Но они очень мелкие, их трудно определить в тонкодисперсном состоянии. Поиски таких алмазов в лунном реголите пока не проводились.

В образцах лунного реголита микроскопически отмечался карбид железа — когенит из железных метеоритов. П. К. Вжолек попытался определить содержание метеоритного углерода и с этой целью провел эксперименты по гидролизу DF магнитных и немагнитных фракций образцов лунного реголита, доставленных «Аполлоном-14 и -16». Образцы реголита 14003 и 14163 «Аполлона-14» в течение последних 60 и 80 млн. лет (величины их космогенных возрастов) находились на поверхности и подвергались микрометеоритной бомбардировке. Их магнитные фракции обогащены металлическими частицами и относительно легколетучими элементами-примесями. Магнитная фракция образца 61500 «Аполлона-16», отобранного на валу кратера Плам, также содержит металлические частицы с повышенной концентрацией Ni и Co.

Масс-спектрометрический анализ продуктов DF гидролиза и вакуумного пиролиза при 1300° показал что CD_4 из магнитных фракций выделяется больше, чем из немагнитных, — для реголита «Аполлона-14» — в 1,4 раза, для реголита «Аполлона-16» — в 9,2 раз (табл. 27). В магнитных фракциях найдено больше и общего углерода. При пиролизе из образцов выделены H_2O , CO , CO_2 , N_2 , небольшие количества CH_4 , HCN , NO , H_2S , Ar^{36} , Ar^{40} , SO_2 , из магнитных фракций — также C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , O_2 . По соотношению CD_4/CH_4 и общему углероду во фракциях подсчитано, что метеоритного углерода (в составе когенита) в трех образцах реголита содержится $2,5 \cdot 10^{-4}\%$ (обр. 14003), $4,3 \cdot 10^{-4}\%$ (обр. 14163) и $2,1 \cdot 10^{-4}\%$ (обр. 61500).

Таблица 27

Содержание газов, выделенных при гидролизе DF-кислотой из магнитных и немагнитных фракций образцов реголита «Аполлона-14 и -16», в наномольх/г
(по П. К. Вжолку, 1973)

Образец	14003		14163.98		61500.8	
Фракция	маг- нитная	немаг- нитная	маг- нитная	немаг- нитная	маг- нитная	немаг- нитная
CD ₄	290	210	280	190	879	96
CH ₄	74	58	81	82	201	27,2
C ₂ H ₆	26	43	+*	+	37	не опр.
Дейтерированные углеводороды						
ряда C ₂	121	109	+	+	41,7	63,9
» C ₃	31	24	+	+	16,2	14
» C ₄	4	не опр.	+	+	5,8	не опр.
» C ₅	3	»	+	+	2,4	»
CD ₄ /CH ₄	3,9	3,6	3,5	2,3	4,4	3,6
Общий C (10 ⁻⁴ %)	185	135	210	125	103	51
Общий N (10 ⁻⁴ %)	52	95	358	68	43	19

* Соединения, отмеченные качественно, обозначены знаком +.

Углеродистые вещества могли поступать на поверхность Луны не только в составе метеоритов, но также в составе комет. Возможный привнос кометного вещества был обнаружен в материковом образце 66095.89, доставленном «Аполлоном-16». В этом образце выявлены особенности перекристаллизации, обусловленные сильным ударом. В нем обнаружена ассоциация фаз, обогащенных относительно легколетучими элементами — хлором, серой, свинцом, цинком, а также найден гетит FeOOH (рис. 25). Гетит ассоциирует с металлическим никелистым железом, с троилитом, сфалеритом и сульфатами, содержащими Cl, Zn, Fe. Предполагают, что удар кометы образовал кратер Норс-Рей. Привнос углерода на лунную поверхность возможен, кроме того, в составе тонкодисперсных межпланетных частиц.

Следовательно, метеоритная бомбардировка обусловила привнос на лунную поверхность углерода в составе карбида железа. При взрыве во время падения метеоритов различные формы метеоритного (и лунного) углерода должны

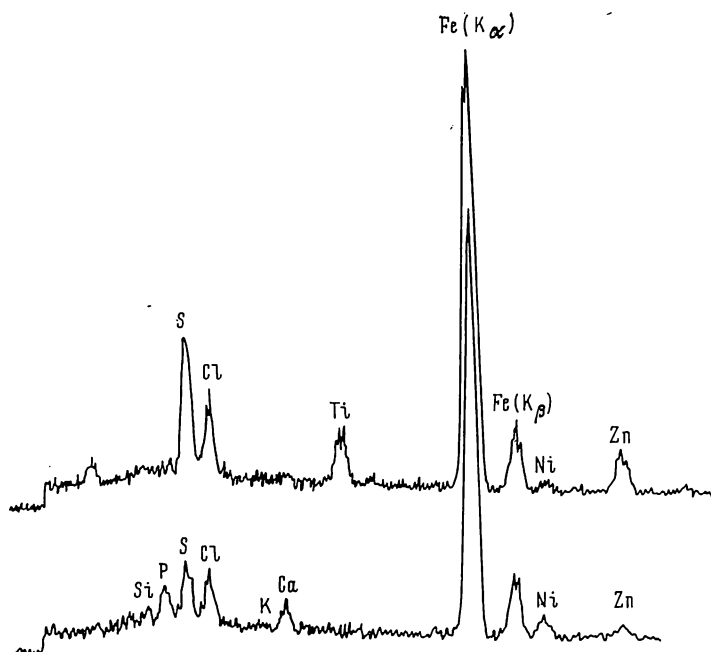


Рис. 25. Распределение Fe, Ni, Zn, S, Cl и других элементов в двух фазах материкового образца 66095.89, доставленного «Аполлоном-16» (по А. Эль Горези, 1973).

были испытывать процесс природного пиролиза. Образующиеся при этом газы CO , CO_2 , CH_4 и др. частично могли сохраниться в веществе лунной поверхности. В составе метеоритов, комет и межпланетного вещества могли быть привнесены разнообразные формы углерода, включая органические соединения и полимерное углеродистое вещество. Формы других легколетучих элементов частично также имеют метеоритное происхождение (сера троилита, фосфор шрейберзита и др.).

ПРИВНОС ВНЕЛУННОГО УГЛЕРОДА СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ

В течение 4,5 млрд. лет поверхность Луны облучается космическими частицами Солнца, состоящими из многих химических элементов. Привнос водорода и углерода солнечным

ветром является одним из важных источников углеродистых соединений на лунной поверхности. Эксперименты, проведенные космонавтами «Аполлона», в частности при посадке на территорию Моря Спокойствия, показали, что поток гелия солнечного ветра составляет $6,3 \pm 1,2 \cdot 10^6$ атомов/см²·сек. Используя солнечное соотношение элементов, Г. Юри с соавторами подсчитали, что общий привнос углерода солнечного ветра на Луне мог составить 0,011125 г/см². При анализе изотопного состава редких газов в образцах лунного реголита было показано, что солнечная компонента редких газов концентрируется особенно в верхних участках (толщиной в сотни ангстрем). Причем содержание солнечной компоненты коррелируется с содержанием углерода и размерами зерен в реголите. Углерод солнечного ветра, внедренный в поверхностные участки зерен реголита, входит в состав метана и карбидов.

Образование углеводородов, содержащих C—H и C—D-связи, при облучении элементарного углерода (алмаза) протонами и дейтерированными частицами экспериментально показал Э. Целлер. К. Пиллинджер с соавторами облучали различные мишени (железо, алюминий и др.), включая лунные образцы, ионами $^{13}\text{C}^+$ и D_2^+ . Энергии потока (13 кэв/атом для $^{13}\text{C}^+$ и 10 кэв/молекулу для D_2^+) были сравнимы с энергией для солнечного ветра (1 кэв/нуклон); дозы составляли, соответственно, $5 \cdot 10^{15}$ атомов/см² и $1 \cdot 10^{18}$ молекул/см² при потоках $3 \cdot 10^{12}$ атомов/сек и $1,4 \cdot 10^{14}$ молекул/сек. Меченые продукты после их освобождения кислотным гидролизом или пиролизом исследовались масс-спектрометрией. Результаты изучения (табл. 28) показали, что при экспериментальном облучении реголита метан синтезируется либо полностью (в виде C^{13}D_4), либо частично (C^{12}D_4) из внедренных частиц. Карбид синтезировался в металлических мишенях (Al, Fe) и, возможно, в мишенях реголита. Содержание C^{13}D_4 и C^{12}D_4 в образце реголита составляло 2 и 1%. Среди продуктов пиролиза, проводимого до 800° , C^{13}O и C^{13}O_2 не найдены, хотя идентифицированы при пиролизе до 500° C^{13}D_4 и C^{12}D_4 . Следовательно, как отмечает К. Пиллинджер, углерод и водород солнечного ветра могут реагировать с образованием CH_4 , а углерод солнечного ветра может реагировать с компонентами реголита с образованием карбида.

П. К. Вжолек облучал ионами $^{13}\text{C}^+$ и D_2^+ плавленый кварц, который затем пиролизировался при 1380°C . При пи-

Таблица 28

Относительное содержание меченых форм метана, выделенных кислотным гидролизом и пиролизом из экспериментально облученных мишеней (по К. Пиллинджеру, 1972)

Экспериментальная мишень	Внедренные частицы	Методы разложения образца	Меченые формы метана		
			$C^{13}D_4$	$C^{12}D_4$	$C^{12}H_4$
Синтетическая смесь, соответствующая лунному реголиту	C^{13}, D	HF	26	69	5
Реголит 12033	C^{13}, D	HCl	27	64	9
Раздробленная порода 12022	C^{13}, D	»	32	62	6
Алюминиевая фольга	C^{13}	DCI	100	—	—
Пластика железа на стекле	C^{13}	»	100	—	—
Синтетическая смесь	C^{13}	Пиролиз до 500° C	+	+	—
Реголит 12033	C^{13}, D	Пиролиз до 800°	+	+	—
Раздробленная порода 12022	C^{13}, D	То же	+	+	—

ролизе выделены $C^{13}O$ (максимумы выделения при 1240 и 1380°), $C^{13}O_2$ (600°), $C^{13}D_4$ (770°) и вода в виде HDO (770°).

Природу метана в лунных образцах реголита, доставленного «Аполлоном-11 и -12», изучали П. Кадоган с соавторами при обработке образцов раствором DCI в D_2O с последующим анализом газов с помощью газовой хроматографии и масс-спектрометрии. Содержание CH_4 определено в 0,11—5,2 $мкг/г$, CD_4 в 0,8—22 $мкг/г$, причем содержание метана коррелировалось с Ar^{36} , с содержанием углерода и его изотопным составом, с содержанием частиц, имеющих аморфную оболочку, с плотностью треков (следов пробега) космических частиц, со степенью переработки реголита на лунной поверхности. Значительная часть CH_4 локализована в поверхностных участках зерен реголита до глубины 1000 Å. Все это свидетельствует о значительной роли солнечного ветра в формировании CH_4 .

П. Холланд провел подробное изучение распределения углеводородных газов и редких газов солнечного ветра в образцах реголита и во фракциях, разделенных по размеру

Таблица 29

Содержание газов, выделенных при обработке DF-кислотой образцов
реголита, доставленных «Аполлоном-14», в паномолях на 1 г
(по П. Холланду, 1972)

Компо- ненты	Фракции образца 14240.5, в мк					Траншейные образцы		
	>420	420—106	106—53	53—37	<37	14148.3 (поверх- ность)	14156.6 (середина)	14149.25 (дно)
CH ₄	15	24	110	120	300	260	160	150
CD ₄	57	130	450	380	770	810	580	370
C ₂ H ₆	—	1	10	13	140	3,5	10	1,2
DCN	—	0,5	60	62	24	50	20	13
D ₂ S	—	2	7200	1900	12200	760	4700	3700
CS ₂	—	15	10	2,6	47	110	7,6	4
Ne ²⁰	7	10	20	23	72	40	31	38
Ar ³⁶	1,3	2,9	8	12	21	25	15	12

зерен, при их обработке DF-кислотой. Угледородные газы, выделенные из образцов реголита, представлены главным образом CD₄, CH₄ и C₂D₆ при содержании присущих метана и этана 1,2 и 0,03 *мкг/г*. Содержание метана во фракциях образца реголита 14240.5 коррелировалось с содержанием Ne²⁰ и Ar³⁶ и зависело от размера зерен (табл. 29, рис. 26). Большее содержание этих компонентов наблюдалось в более тонких фракциях. Эти фракции имеют большую поверхность зерен, и они соответственно больше накопили газов солнечного ветра. Количество CH₄, накопившееся при влиянии солнечного ветра, оценено в $2 \cdot 10^{12}$ молекул/см²·год. В траншейных образцах реголита «Аполлона-14» большая концентрация метана и редких газов отмечена на поверхности, наименьшая — в реголите со дна траншеи (см. табл. 29). Это свидетельствует о значительной роли солнечного ветра в образовании метана и карбида в веществе лунной поверхности.

В образцах реголита «Аполлона-16», взятых на валу кратера Плам из траншеи с ее дна (обр. 61221.7) и поверхности (обр. 61241.8), как можно видеть из приводимой выше табл. 24, содержание газов, которые были выделены при обработке образцов DF-кислотой, различается. В образце со дна траншеи меньше дейтерированных углеводородов и

инертных газов солнечного ветра (Ne^{20} и Ar^{36}). Этот образец имеет более короткий космогенный возраст, и в образце меньше образовалось углеродистых соединений под влиянием солнечного ветра.

Следовательно, частицы солнечного ветра привнесли углерод в вещество лунной поверхности в составе метана.

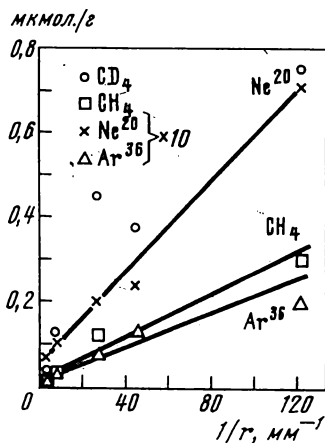


Рис. 26. Зависимость содержания CH_4 , Ne^{20} , Ar^{36} от размера зерен в лунном реголите 14240.5 (по П. Т. Холланду).

Газы выделены при обработке образца HF -кислотой.

При взаимодействии частиц солнечного ветра с лунным веществом могли образоваться карбиды железа, алюминия и др., различные органические соединения, вода серосодержащие соединения (сульфиды и др.), а также частично были привнесены водород и редкие газы.

Содержание форм углерода разного происхождения различно. По приблизительной оценке Дж. Оро, в лунных образцах 40 % углерода представлено первично лунным углеродом, 10 % привнесено метеоритами и кометами, 50 % образовалось при воздействии солнечного ветра. Общее сходство углеродистых соединений, найденных в веществе лунной поверхности и образованных различным путем — при ранней дегазации Луны, в результате привноса метеоритного вещества и при воздействии космического облучения (солнечного ветра) — подтверждает вывод о сходстве углеродистых соединений в природе независимо от их происхождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты изучения Луны позволили выяснить ряд основных вопросов экзобиологии Луны.

Условия формирования Луны не способствовали созданию на ней среды, необходимой для возникновения жизни. Поэтому на Луне отсутствует сейчас и отсутствовала в прошлом какая-либо жизнь. На ранней стадии развития Луна прошла этапы дифференциации, образования в результате магматических процессов материковых участков анортозитового состава (более 4 млрд. лет назад), излияния лав в результате магматической деятельности, образовавших морские базальты (около 3—3,6 млрд. лет назад).

Кристаллизация лунных пород, как было оценено по данным изотопного состава кислорода и кремния, происходила при температурах 1100—1300° С. Процессы выплавления вещества сопровождались дегазацией легколетучих соединений, включая углеродсодержащие. Но углерод — главный элемент живого вещества — и другие легколетучие химические элементы в основной своей части были потеряны в космический вакуум.

Сохранилась лишь небольшая часть легколетучих при-суще лунных соединений, главным образом в составе газовых пузырьков. Частично углерод образовал труднолетучие формы — карбиды, графит и др. Легколетучие соединения, выделившиеся в процессе дегазации, не были удержаны из-за небольшого гравитационного поля Луны и не образовали гидросферу и атмосферу — среду жизни.

После образования лунных морей и до настоящего времени лунная поверхность (как главная потенциальная зона возникновения жизни) испытывала воздействие экзогенных факторов — метеоритную бомбардировку, космическое

облучение, воздействие температурных перепадов в дневное и ночное время. Это обусловило образование лунного грунта (реголита) в условиях, полностью отличающихся от условий земного выветривания. Не исключено, что реголит частично мог образоваться еще раньше, при изверженных процессах, в результате тонкого распыления капелек вещества на поверхности в лунном вакууме. Метеориты и солнечный ветер привнесли внелунный углерод, образовавшийся при взаимодействии с лунным веществом карбиды. Частично таким же путем образовалась H_2O и др.

Общее содержание углерода (в среднем $200 \cdot 10^{-4} \%$) и других легколетучих элементов, образованных на поверхности Луны из различных источников, сравнительно небольшое. Если принять содержание воды в метеоритах — углистых хондритах ($\sim 15 \%$) за ту воду, которая первоначально находилась и в лунном веществе на ранней стадии ее развития, то при современном содержании воды в лунном веществе около $200 \cdot 10^{-4} \%$ (возникшей из различных источников) можно видеть, что на Луне осталось только $0,1 \%$ первоначальной воды. Если бы воды на Луне было больше, то из лунных карбидов, в присутствии воды, химическим путем могло бы образоваться больше органических соединений, чем в действительности наблюдается в лунном веществе.

Легколетучие химические элементы, включая углерод, широко распространены в солнечной системе, особенно в составе внешних планет (группа Юпитера). Эти планеты составляют более $99,5 \%$ от всей массы планет Солнечной системы и состоят из гелия, водорода, углерода, азота, кислорода и др. Не исключено поэтому, что при благоприятном развитии среды на каком-либо из спутников внешних планет могла возникнуть жизнь, основанная на углероде. Поэтому поиски таких форм жизни перспективны, кроме Марса — планеты земной группы, также на Титане (спутник Сатурна), параметры которого в некоторых отношениях приближаются к земным.

Среда на других планетах земной группы — Венере и Меркурии — неблагоприятна для жизни, поскольку на поверхности Венеры, как известно, очень высокая температура и высокое давление, Меркурий же почти лишен атмосферы; его поверхность, подобно поверхности Луны, покрыта многочисленными кратерами.

Выступая в 1973 г. на юбилейном заседании Общего собрания Академии наук СССР, посвященном 500-летию со дня рождения Николая Коперника, президент Академии наук СССР академик М. В. Келдыш сказал: «Мы переживаем эпоху, когда человек оторвался от Земли и получает возможность непосредственного исследования планет. Люди, несомненно, достигнут других планет и, может быть, других миров, когда физикой будут открыты новые, еще более эффективные источники энергии. И важнейшие вопросы мировоззрения состоят в том, если ли жизнь где-либо, кроме нашей планеты, не занимает ли человек Земли в этом смысле исключительного положения, происходят ли во Вселенной еще неизвестные нам процессы превращения энергии и массы, которые могут быть использованы для блага человека».

ЛИТЕРАТУРА

- Л. В. Бершов, А. М. Борсук, В. И. Виноградов, Л. А. Кондаков, И. В. Чернышов. Вещество Луны по материалам «Аполлона-11». М., Изд-во ВИНТИ, 1971.
- Г. П. Вдовыкин. Углеродистое вещество метеоритов (органические соединения, алмазы, графит). М., «Наука», 1967.
- Г. П. Вдовыкин. Первичные углеродистые соединения и их превращения в природе.— В сб. «Физика планет». Алма-Ата, «Наука» Каз.ССР, 1967, стр. 151—158.
- Г. П. Вдовыкин. Межзвездный углерод и некоторые связанные с ним вопросы.— В сб. «Проблемы космохимии». Киев, «Наука» УССР, 1974, стр. 164—176.
- Г. П. Вдовыкин. Метеориты. М., «Наука», 1974.
- Г. П. Вдовыкин, А. Н. Дремин, С. В. Першин, И. Д. Шевалеевский. Превращение метеоритного вещества в экспериментах по ударному сжатию при давлениях 500 и 1000 кбар, создаваемых взрывом.— «Физика горения и взрыва», т. 9, № 4, 1973, стр. 535—541.
- В. И. Вернадский. Начало и вечность жизни.— В кн.: В. И. Вернадский. Избранные сочинения. Изд-во АН СССР, М., 1960, т. 5.
- А. П. Виноградов. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-20».— «Геохимия», № 7, 1972, стр. 763—774.
- Дж. Вуд. Метеориты и происхождение солнечной системы. М., «Мир», 1971.
- П. В. Гаст. Химия земных и лунных базальтовых пород (Перевод Г. П. Вдовыкина и А. А. Кадика). М., «Наука», 1973.
- У. Каула. Введение в физику планет земной группы. М., «Мир», 1971.
- И. Н. Кропоткин. Эволюция Земли. М., «Знание», 1964.
- Е. К. Лазаренко, А. А. Ясинская. Некоторые современные аспекты космической минералогии.— «Минералогический сб. Львовского Гос. Ун-та им. Ив. Франко», № 24, вып. 4, 1970, стр. 367—384.
- «Лунный грунт из Моря Изобилия». М., «Наука», 1974.
- Б. Мэйсон, У. Мелсон. Лунные породы. М., «Мир», 1973.
- «Населенный космос». М., «Наука», 1972.
- А. И. Опарин. Возникновение и начальное развитие жизни. М., 1966.
- «Очерки современной геохимии и аналитической химии». М., «Наука», 1972.
- Э. В. Соболевич. Изотопная космохимия. М., Атомиздат, 1974.

- Ю. А. Сурков, В. В. Шандор, Ю. П. Топоров, Г. П. Вдовыкин. Изучение состава газов, выделяющихся при нагреве реголита «Луны-16». — В сб. «Советско-американская конференция по космохимии Луны и планет. 4—8 июня 1974 г., Москва». «Наука», М., 1974.
- К. Э. Циолковский. Собрание сочинений, т. 4. Естествознание и техника. М., «Наука», 1964.
- E. Anders. Meteorites and the early solar system. — «Annual Review of Astronomy and Astrophysics», vol. 9, 1971, p. 1—34.
- P. I. Bluzmanas. Gyvybė Visatoje (Kosminės biologijos problemos). Vilnius, «Mintis», 1973.
- S. Chang, R. Mack, E. K. Gibson, Jr., G. W. Moore. Simulated solar wind implantation of carbon and nitrogen ions into terrestrial basalt and lunar fines. — «Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference. Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement 4», vol. 2, 1973, p. 1509—1522.
- «Chemical evolution and the origin of life». Eds. R. Buve and C. Ponnamperna. Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1971.
- «Handbook of elemental abundances in meteorites». Ed. B. Mason. N. Y. — P. — L., Gordon and Breach Sci. Publ., 1971.
- A. A. Levinson, S. R. Taylor. Moon rocks and minerals. N. Y., Pergamon Press, 1971.
- Luna 20. «Geochimica et Cosmochimica Acta», vol. 37, N 4. 1973.
- J. Oró. Extraterrestrial organic analysis. — «Space Life Sciences», vol. 3, № 4, 1972.
- «Proceedings of the Apollo 11 lunar science conference. Houston, Texas, January 5—8, 1970». 3 volumes. N. Y., Pergamon Press, 1970.
- «Proceedings of the second lunar science conference. Houston, Texas, January 11—14, 1971». 3 volumes. Cambridge, MIT Press, 1971.
- «Proceedings of the third lunar science conference. Houston, Texas, January 10—13, 1972». 3 volumes. Cambridge, MIT Press, 1972.
- «Proceedings of the fourth lunar science conference. Houston, Texas, March 5—8, 1973». 3 volumes. Pergamon Press, 1973.
- H. C. Urey. A review of the structure of the Moon. — «Proc. Amer. Phil. Soc.», vol. 115, N 2, 1971.
- G. P. Vdovykin. Ureilites. — «Space Science Reviews», vol. 10, N 4, 1970, p. 483—510.
- G. P. Vdovykin. The Canyon Diablo meteorite. — «Space Science Reviews», vol. 14, N 6, 1973, p. 758—831.
- G. P. Vdovykin. Environment of evolution of organic compounds of carbonaceous chondrites. — In: «4th International Conference on the Origin of Life, 1st ISSOL Meeting. Resúmenes de Comunicaciones. Barcelona, Junio 25—28, 1973». Coloquium 1, report 4, España, 1973.
- P. C. Wszolek, B. R. Simoneit, A. L. Burlingame. Studies of magnetic fines and volatile-rich soils: Possible meteoritic and volcanic contributions to lunar carbon and light element chemistry. — «Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Geochim. Cosmochim. Acta, Suppl. 4», vol. 2, 1973, p. 1693—1706.
- E. J. Zeller, L. B. Ronca. The surface geochemistry of solid bodies in space. — In: «Origin and distribution of the elements». Ed. L. H. Ahrens. Pergamon Press, 1968.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Исследования Луны космическими аппаратами . .	5
Изучение рельефа и поверхности Луны . . .	5
Доставка лунных образцов при полетах автоматиче- ских станций и пилотируемых космических кораблей	16
Глава 2. Среда Луны	28
Условия пребывания человека на Луне	28
Сходство и отличия лунных и земных пород . .	29
Метеоритная бомбардировка	45
Глава 3. Биология Луны	54
Поиски живых и fossilized микроорганизмов в лунных образцах	55
Выживание земных микроорганизмов в лунных ус- ловиях и техногенная контаминация лунной по- верхности	56
Проверка токсичности лунных пород на земные ор- ганизмы	59
Глава 4. Органогенные химические элементы и их изотоп- ный состав в лунных образцах	60
Углерод, водород и азот	60
Сера, фосфор и кислород	68
Глава 5. Формы углерода в лунных образцах	73
Изучение соединений углерода и других органоген- ных элементов	73
Главные формы углерода	91
Биохимически важные органические соединения	96
Общий состав углеродистого вещества	102

Глава 6. Источники углерода в веществе лунной поверхности	104
Дегазация Луны	104
Привнос внелунного углерода метеоритами и кометами	105
Привнос внелунного углерода солнечным ветром	108
Заключение	113
Литература	116

Геннадий Петрович Вдовыкин
ЭКЗОБИОЛОГИЯ ЛУНЫ

Утверждено к печати редколлегией серии
научно-популярных изданий Академии наук СССР

Редактор *Е. М. Кляус*

Художественный редактор *В. А. Чернецов*

Технический редактор *Ф. М. Хенох*

Сдано в набор 15/VIII 1974 г. Подписано к печати 27/XI 1974 г.
Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 6,4.
Уч.-изд. л. 6,2. Тираж 19 500. Т-13465. Тип. зак. 1009. Цена 40 коп.

Издательство «Наука». 103717 ГСП,
Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука». 121099,
Москва, Г-99, Шубинский пер., 10



ИЗДАТЕЛЬСТВО

«НАУКА»

ГОТОВИТСЯ К ПЕЧАТИ

КНИГА:

ЗАЙЦЕВ Ю. И. Спутники «Космос». 10 л. 65 к.

16 марта 1962 г. начал орбитальный полет первый искусственный спутник Земли серии «Космос». С того времени «Космосы» завоевали прочное место в арсенале средств исследования космического пространства. Программа исследований, выполняемая советскими учеными с помощью спутников серии «Космос», весьма разнообразна. В книге рассказывается об общих принципах и задачах этой программы.

Читатель познакомится с устройством спутников серии «Космос», составом служебной и научной аппаратуры, устанавливаемой на них, узнает о важнейших научных результатах, полученных с помощью этих спутников.

Книга рассчитана на широкий круг читателей.

Для получения книги почтой заказ просим направлять по адресу:

МОСКВА. В-463, Мичуринский проспект, 12, магазин «Книга — почтой» Центральной конторы «Академкнига»; ЛЕНИНГРАД. П-110, Петрозаводская ул., 7, магазин «Книга — почтой» Северо-Западной конторы «Академкнига» или в ближайшие магазины «Академкнига».

Адреса магазинов «Академкнига»:

Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97; Баку, ул. Джапаридзе, 13; Днепропетровск, проспект Гагарина, 24; Душанбе, проспект Ленина, 95; Иркутск, 33, ул. Лермонтова, 303; Киев, ул. Ленина, 42; Кишинев, ул. Пушкина, 31; Куньбешев, проспект Ленина, 2; Ленинград. Д-120, Литературный проспект, 57; Ленинград, Менделеевская линия, 1; Ленинград, 9 линия, 16; Москва, ул. Горького, 8; Москва, ул. Вавилова, 55/7; Новосибирск, Академгородок, Морской проспект, 22; Новосибирск, 91, Красный проспект, 51; Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137; Ташкент, Л-29, ул. Ленина, 73; Ташкент, ул. Шота Руставели, 43; Томск, наб. реки Ушайки, 18; Уфа, Коммунистическая ул., 49; Уфа, проспект Октября, 129; Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42; Харьков, Уфимский пер., 4 б.