

**ПЕРВЫЕ ИТОГИ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ
ГРУНТОВ ЛУНЫ**



МОСКВА — 1970

ГОССТРОЙ СССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ОСНОВАНИЙ И ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*И. И. Черкасов, В. В. Михеев, М. И. Смородинов,
К. П. Флоренский, В. В. Шварев, В. П. Петрухин,
Н. М. Зобачев], А. А. Морозов*

ПЕРВЫЕ ИТОГИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ЛУНЫ

Под редакцией проф. д-ра техн. наук
В. Г. Булычева



ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ
Москва — 1970

В брошюре приведен краткий обзор результатов исследования поверхностного слоя лунных грунтов астрономическими и радиоастрономическими методами, а также с помощью космических аппаратов, совершавших облет Луны. Более подробно освещены методы исследований лунных грунтов с помощью автоматических станций «Луна-9», «Луна-13», «Сервейер», осуществивших мягкую посадку на поверхность Луны, и полученные ими данные об инженерно-строительных свойствах лунного грунта — плотности, механической прочности, составе и структуре.

Приведены предварительные результаты исследований образцов лунных грунтов, доставленных на Землю кораблем «Аполлон-11», и сводка современных представлений о поверхностном слое лунного грунта.

В брошюре содержатся сведения об устройстве приборов, осуществивших первую инструментальную разведку лунных грунтов, о методах исследования грунтов в условиях лунной гравитации и вакуума, а также о моделирующих материалах — земных аналогах грунтов Луны.

Брошюра предназначена для широких кругов строителей, специалистов по механике грунтов и грунтоведов, интересующихся проблемами космического естествознания и новыми методами исследования грунтов.

Таблиц 9, иллюстраций 18, библиография 56 наименований.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 1959 г. космические аппараты «Луна-1», «Луна-2», «Луна-3», запущенные Советским Союзом, осуществили соответственно первый полет к Луне, жесткую посадку на ней, облет Луны и фотографирование ее обратной стороны. За 10 лет, прошедших со времени их запуска, человечество получило информацию, превышающую по объему и научному значению всю сумму знаний о Луне, которыми люди до этого располагали.

В результате космических экспериментов 1959—1969 гг. были получены детальные фотографии поверхности Луны; оценен состав лунных грунтов [1] и определены их структурно-механические свойства; отработаны методы мягкой посадки космических аппаратов на Луну и возвращения их на Землю, осуществлены первые полеты людей на Луну.

Вопросы исследования лунной поверхности и лунных грунтов вызывают всеобщий глубокий интерес. С одной стороны, эти исследования проливают свет на коренные вопросы происхождения Луны, Земли и планет Солнечной Системы, расширяют и углубляют наши знания о Вселенной. С другой стороны, они имеют важное прикладное значение для разработки конструкций лунных кораблей и снаряжения космонавтов. Наконец, сложная и высокоэффективная современная техника космических экспериментов и разработка уникальных высокочувствительных, легких и малогабаритных приборов могут быть с большой пользой применены на Земле при проведении исследований грунтов, в первую очередь в труднодоступных и отдаленных районах.

В настоящее время результаты исследований Луны освещены главным образом на страницах специальных журналов и в трудах международных конгрессов по космическим исследованиям и малодоступны читателям, не связанным с этими областями науки.

В этой брошюре делается первая попытка краткого обзора исследований грунтов Луны, сделанных до настоящего времени: излагаются результаты астрономических и радиоастрономических определений свойств поверхности Луны, а также рассматриваются и сопоставляются основные гипотезы о происхождении и строении

поверхностного слоя, возникшие на основе этих исследований; рассматриваются результаты фотографирования лунной поверхности с космических аппаратов; дается обзор лабораторных исследований материалов, моделирующих лунные грунты в земных условиях; приводятся данные относительно испытаний грунтов в условиях лунной гравитации и в глубоком вакууме. Мнения многих ученых и полученные ими данные в ряде случаев сильно отличаются друг от друга.

Основное внимание в брошюре уделено прямому инструментальному определению свойств лунных грунтов с помощью автоматических лунных станций, осуществивших мягкую посадку на поверхность Луны. До последнего времени автоматические лунные станции являлись основными источниками информации о грунтах Луны. При оснащении их более совершенной аппаратурой, новыми автоматическими устройствами и лучшими средствами передачи информации на Землю, автоматические станции, которые намного дешевле пилотируемых, еще долгое время смогут выполнять значительную часть исследований на Луне без риска для жизни людей [55].

В заключительной главе освещаются современные представления о лунных грунтах с учетом первых результатов исследования образцов, доставленных космонавтами на Землю. Эти исследования в значительной мере подтвердили правильность полученных ранее с помощью автоматических станций данных и в то же время привели к совершенно новым результатам, представляющим большой научный интерес.

*Ордена Трудового Красного Знамени
Научно-исследовательский институт оснований и
подземных сооружений Госстроя СССР*

1. АСТРОНОМИЧЕСКИЕ И РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Луна — ближайшее к Земле небесное тело. Параметры Луны и ее окружения значительно отличаются от параметров Земли (табл. 1).

Таблица 1

Основные параметры Земли и Луны

Характеристика	Земля	Луна
Диаметр в км	12 742	3476 ($\frac{1}{4}$ диаметра Земли)
Средняя плотность в г/см ³ .	5,52	3,33 (0,6 средней плотности Земли)
Ускорение силы тяжести в см/сек ²	981 (1 g)	164 ($\frac{1}{6}$ g)
Температура поверхности в °С	От + 70 до — 70	От + 120 до — 150
Атмосферное давление в мм рт. ст.	760	10 ⁻¹³ — 10 ⁻¹⁶

Глубокий вакуум, длительное воздействие активной космической радиации и излучения Солнца, непрерывное падение метеоритов и малая сила тяжести создают несвойственные Земле условия формирования лунной поверхности. Кроме того, на Луне полностью отсутствуют гидросфера и биосфера, играющие важную роль в процессах генезиса грунтов на Земле. Поэтому формирование лунного рельефа и грунтов поверхностного слоя, а также вопросы механики лунных грунтов необхо-

димо рассматривать в тесной связи с условиями, присущими только Луне.

Возраст Луны около 4 млрд. лет. За это время на ее поверхности могли происходить различные процессы, обусловленные как внутренними факторами (вулканические явления и сейсмические удары), так и внешними (удары крупных метеоритов, бомбардировка микрометеоритами, резкое колебание температуры поверхности под действием солнечного тепла, корпускулярная и волновая радиации).

Многочисленные гипотезы формирования лунного рельефа могут быть объединены в две группы: 1) объясняющие возникновение кратеров и цирков проявлением вулканических процессов Луны (эндогенное направление); 2) полагающие, что основным рельефообразующим фактором является падение метеоритов (экзогенное направление).

Вулканическая гипотеза широко распространена среди селенологов, которые утверждают, что лунные моря представляют собой опускания поверхности, заполненные расплавленной поднявшейся из лунных недр магмой. Согласно этой гипотезе образованные однажды формы рельефа изменялись, поэтому современная поверхность Луны является результатом взаимодействия многочисленных и длительных процессов. Предполагается, что образование кратеров многократно сменялось образованием морей.

А. В. Хабаков, наиболее полно разработавший вулканическую гипотезу, связывает эти процессы с периодическими сжатиями и расширениями лунного шара. По его мнению, в эпохи расширения лунного шара возникали кратеры, а в эпохи сжатия — лунные моря, при этом существовало всего семь периодов рельефообразования.

Подтверждением вулканической гипотезы являются работы по радиоастрономии В. С. Троицкого и В. Д. Кротикова [2], доказавшие существование горячих недр Луны.

К современному проявлению вулканизма на Луне можно отнести также газовую эмиссию, которую наблюдал Н. А. Козырев в кратере Альфонс.

Метеоритная (экзогенная) гипотеза формирования поверхности Луны наиболее полно разработана американскими учеными Р. Болдуином [3] и Г. Юри [4].

Согласно наиболее общему варианту экзогенной гипотезы лунный рельеф сформировался в результате бомбардировки лунной поверхности метеоритными телами.

В земных условиях атмосфера вызывает торможение или сгорание всех падающих метеоритов весом от 10^{-7} до 10^3 г. Только крупный метеорит может нанести удар по земной поверхности. На Луне атмосфера отсутствует и падающий метеорит действует как бомба большой взрывной силы.

Изучение метеоритных кратеров на Земле в естественных условиях и кратеров, полученных при сверхскоростных ударах в лабораториях [5], а также теоретические расчеты К. П. Станюковича и В. В. Федынского [6] показали, что большая часть энергии удара, наносимого с космической скоростью, переходит в энергию волн, которые размельчают материал поверхности и выбрасывают его из кратера. При скорости соударения 15—20 км/сек масса выброшенной породы в 1000 раз превосходит массу ударяющего тела.

Основные формы современного лунного рельефа, по мнению Г. Юри, сложились примерно 4,5 млрд. лет назад вследствие интенсивной бомбардировки Луны телами небольших астероидов или гигантских метеоритов. С тех пор лунный рельеф, считает Г. Юри, изменился незначительно.

В подтверждение метеоритной гипотезы были проведены многочисленные эксперименты по искусственному моделированию в лабораториях лунных кратеров. П. Ф. Сабанеев [7], например, сбрасывал на слой тонкого минерального порошка (цемент, мел) порции того же порошка и получил миниатюрные кратеры, похожие на лунные.

Обе гипотезы происхождения лунного рельефа имеют определенные достоинства и недостатки. Нельзя, по-видимому, являясь сторонником одной гипотезы, полностью отвергать другую. Очевидно, действовали оба механизма рельефообразования, и современная поверхность Луны есть результат сложного взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов.

Уже сейчас сторонники этих гипотез придерживаются единых взглядов по некоторым вопросам. Так, сторонники эндогенного направления считают, что кратеры-лунки, которые разбросаны на поверхности Луны без связи с рельефом, имеют метеоритное происхождение.

Г. Юри и Р. Болдуин — сторонники метеоритной гипотезы — отводят определенную роль внутренним процессам на Луне.

Астрономические наблюдения за яркостью, окраской, поляризацией и другими особенностями света, отражаемого лунной поверхностью, интенсивные радиолокационные и радиоастрономические исследования проводятся с целью решения вопроса о генезисе, строении и свойствах не только Луны в целом, но и ее поверхностного слоя. Указанные методы позволили к началу исследований лунной поверхности с помощью космических аппаратов считать твердо установленными следующие факты [8, 9].

1. Лунная поверхность характеризуется низкой отражательной способностью и отражает всего 5—18% солнечного света; цветовые различия на Луне крайне малы. Ее поверхность имеет коричневато-серую или черновато-бурую окраску. Диаграмма зависимости цвета от яркости для поверхности Луны и различных материалов земного происхождения показывает, что нам неизвестны минеральные породы, обладающие цветом лунной поверхности. Это связано, по-видимому, с тем, что грунты Луны имеют иной химический состав или на них длительно воздействовали факторы, не свойственные земному окружению.

2. Свет, отраженный лунной поверхностью, является поляризованным.

3. Теплопроводность пород лунной поверхности крайне низка и примерно в 1000 раз меньше теплопроводности сплошных скальных пород. Поверхность Луны является сильнопористой, губчатой или рыхлой, что указывает на зернистую или пылеобразную породу, а также на пористые отложения типа туфа, пемзы и вулканических шлаков.

4. Отраженный свет распределяется таким образом, что при всех углах падения солнечных лучей максимальная яркость оказывается в направлении Солнца.

С последним положением тесно связано большое количество гипотез о строении и свойствах лунной поверхности. Вследствие низкой температуры поверхность Луны не дает собственного света в оптически наблюдаемом диапазоне. Форма Луны близка к шарообразной, а шар, освещенный извне и рассматриваемый со стороны источника света, должен казаться наиболее ярким в цент-

ре и более темным по краям. Однако это явление на Луне не наблюдается и мы видим Луну в полнолуние как более или менее равномерно яркий диск. Еще в XVII в. Галилей объяснил это тем, что лунная поверхность иссечена мелкими неровностями, лежащими за пределами разрешающей силы телескопов.

Исследования Н. П. Барабашева, Н. С. Орловой, В. Г. Фесенкова и других астрономов подтвердили впоследствии предположения Галилея. Они пришли к выводу, что наружная поверхность Луны покрыта бесчисленным множеством впадин и выступов с очень крутыми и даже отвесными стенками и острыми краями. Наружный покров, по мнению Н. С. Орловой, своим ноздревато-иссеченным строением напоминает губку или вулканические шлаки, которые образуются на поверхности потоков лавы земных вулканов при застывании огненно-жидкой каменной пены.

Исследования Хапке и Ван Хорна [10] показали, что для наиболее полного соответствия закона отражения, установленного для лунной поверхности, она должна иметь чрезвычайно сложную дендритную структуру с многочисленными сообщающимися между собой каналами и порами. Элементы, образующие эту структуру, должны быть достаточно велики по сравнению с длиной волн видимого света. Такая геометрическая структура лунного покрова до глубины нескольких миллиметров или сантиметров, по мнению Уоррена [11], представляет совокупность случайно расположенных линейных элементов, разделенных сравнительно большими пустотами, и напоминает затвердевший пух. Подобная структура может образоваться из шлаковых пород под действием протонной бомбардировки. На Земле аналогичные минеральные материалы отсутствуют. Наиболее близки по структуре к лунной поверхности некоторые органогенные структуры — плесени, губки, мхи (рис. 1).

В более поздних экспериментах Хапке получил из весьма рыхло упакованных частичек структуры, которые образовывались в результате медленного оседания в воздухе пылинок размером около 20 мк. Макропористая модель такого типа, склеенная Хапке из отдельных минеральных зерен, представлена на рис. 2.

Фотометрическими исследованиями микрорельефа лунной поверхности, проведенными Н. П. Барабашевым, А. Т. Чекирдой, В. И. Езерским и др. [12, 13] установ-

лено, что среди всех исследованных поверхностей наиболее полное совпадение с кривыми изменения яркости лунных морей показывают чрезвычайно пористые губкообразные образцы с очень тонкими и непрозрачными стенками, а также искусственно созданные поверхности

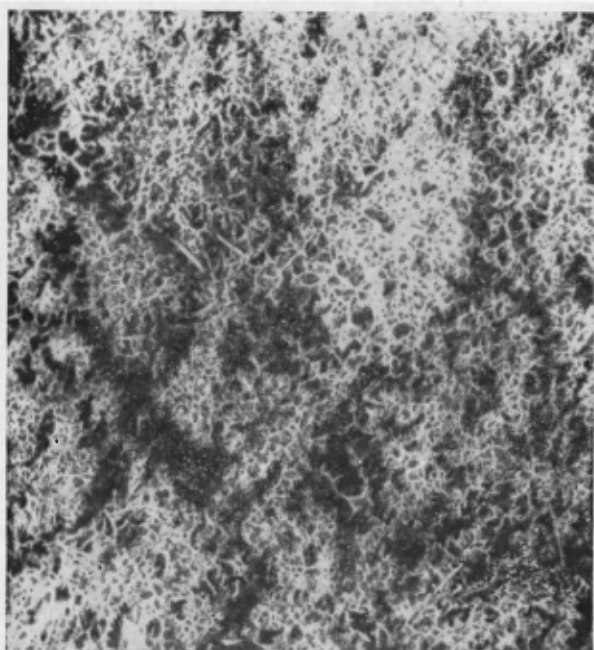


Рис. 1. Дендритная структура плесени Кладония Рантиферина (по Струве)

с остроконечными неровностями. Это позволило авторам прийти к следующему выводу: поверхность Луны чрезвычайно пориста и покрыта обломками вулканических пород или многочисленными пересекающимися трещинами.

Пористость лунной поверхности по площади составляет около 50%, а соотношение глубины к поперечнику пор — около единицы. Оказалось, что из земных горных пород, наиболее соответствуют строению лунной поверхности туфолавы, вулканический шлак, пемза и туф, особенно в раздробленном состоянии, с зернами размером

3—10 мм. Средние размеры высот неровностей составляют 2—5 мм.

Свет Луны в той или иной мере поляризован. Поляризация зависит от прозрачности материала и коэффициента преломления, а также от структуры отражающей

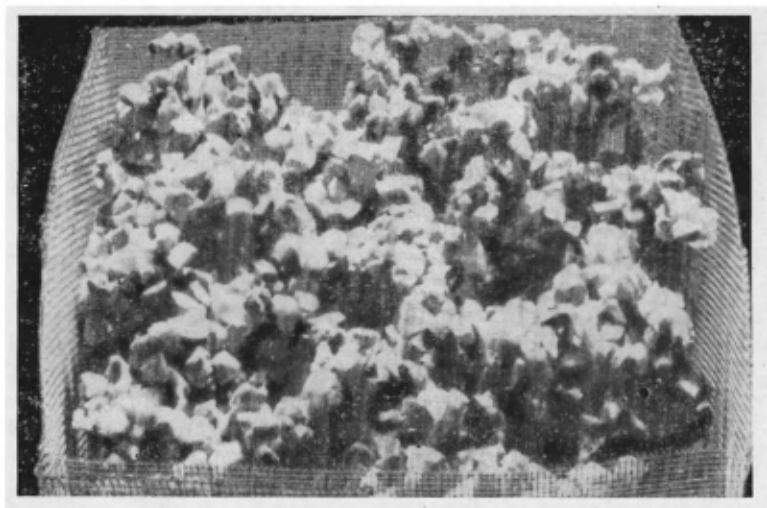


Рис. 2. Увеличенная модель макропористой структуры, приготовленная Хапке из крупных минеральных зерен

поверхности. По степени и знаку поляризации можно судить об этих свойствах. Сравнение поляризации света, отраженного различными частями лунной поверхности, с земными породами и дает представление о структуре и составе верхнего слоя лунной коры. Фундаментальные исследования в этой области были проведены французским ученым Лию и в дальнейшем его учениками [8], заключившими, что верхний слой покрова очень измельчен и по поляризационным свойствам ближе всего к земным породам типа непрозрачной тонкой вулканической пыли, отдельные зерна которой объединены в агрегаты. Анализ поляризации показал, что на поверхности Луны не должно быть обнаженных чистых скальных пород.

Количественные определения поляризации лунного света выполнялись также Н. П. Барабашевым, В. П.

Джапиашвили, А. В. Марковым и др. А. В. Марков [8], например, на основе поляризационных и термоэлектрических измерений пришел к следующему выводу: поверхностный слой Луны глубиной не менее 5 см состоит из мелкозернистого грунта, а средние размеры неровностей на лунной поверхности должны находиться в пределах от 5 см до 5 мм.

По результатам оптических исследований лунной поверхности можно с уверенностью судить лишь о толщине слоя, составляющего от нескольких десятков микрон до нескольких миллиметров.

Иногда достаточно крайне тонкого слоя (доли миллиметра), чтобы полностью изменить оптические свойства изучаемого объекта. Поэтому следует критически подходить к интерпретации результатов, полученных с помощью оптических методов исследования.

В последнее время ведутся интенсивные исследования, связанные с измерением теплового потока от Луны в инфракрасной области спектра и в радиодиапазоне, изучается радиоэхо Луны на различных длинах волн. Эти методы позволили получить новые данные, которые помогают раскрыть природу и физические условия не только верхнего покрова, но и более глубоких недр Луны.

Отражение импульсов радиолокатора зависит от диэлектрической постоянной лунной поверхности, которая в свою очередь является функцией ее состава, плотности и ровности. Обработка радиолокационных данных, полученных при длине волны от 10 до 300 см, показала [5], что поверхность Луны слабоволнистая, гладкая с неровностями менее 1 м, и уклонами от 1 : 10 до 1 : 20; около 10% ее площади покрыто предметами, размеры которых менее длины волн.

Не исключена возможность обнаружения отдельных камней и глыб размерами от 1 до 100 м. Плотность поверхностного слоя очень низкая, но радиолокационные данные не позволяют установить его строение. Это может быть рыхлый порошок, пузырчатая лава или каменные нити. Эванс, например, считает, что поверхность Луны покрыта тонким слоем пыли, а Гудабак — что поверхность представляет волокнистые образования, похожие на жесткую вату [5].

Изучение собственного инфракрасного излучения Луны дает сведения о тепловых свойствах и, следовательно

но, о структуре верхнего слоя (глубиной до 20 см). Эти исследования показали, что лунная поверхность обладает низкой теплопроводностью. По мнению Петтита [5], поверхность Луны представляет собой тонкий слой (2,6 см) пористой породы типа пемзы. Другие исследователи считают, что сравнительно мощные отложения пемзы или гравия покрыты слоем пыли толщиной 2 мм [14].

Из наблюдения собственного теплового радиоизлучения Луны можно определить комбинацию параметров $\gamma = (k\rho c)^{-1/2}$ (где k — теплопроводность, ρ — плотность, c — теплоемкость вещества поверхностного слоя).

Значение γ , полученное в ходе лунаций В. С. Троицким и В. Д. Кротиковым [2], равно 350 ± 75 . Используя эту величину, можно по значениям диэлектрической постоянной ϵ определить среднюю плотность слоя, откуда идет радиоизлучение. Принимая $1 \leq \epsilon \leq 2$ и используя эмпирически найденное соотношение для различных сухих земных пород $\sqrt{\epsilon} - 1 = c\rho$ (где $c \approx 0,5 \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$), В. С. Троицкий и его сотрудники получили значение плотности верхнего покрова Луны, равное: $\rho = 0,5 \text{ г/см}^3$ (при $\epsilon = 1,5$).

В результате радиоастрономических измерений В. С. Троицкий и В. Д. Кротилов [2] обнаружили примерную однородность свойств верхнего слоя Луны до глубины 20 м (согласно более поздним исследованиям — до 6 м). Весь этот слой, по их мнению, очень пористый и имеет вид застывшего пенистого образования, теплопроводность которого $k = 10^{-4} \div 10^{-6} \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$ в 40—60 раз менее теплопроводности плотных земных пород. Температура в слое увеличивается с глубиной, в нижележащих горизонтах градиент становится значительно меньше, поскольку на большей глубине могут находиться более плотные скальные породы.

Результаты астрономических и радиоастрономических методов исследования свойств лунной поверхности обобщены в табл. 2.

Исследование Луны наземными методами дает возможность не только определить некоторые параметры лунной поверхности, но и составить целостное представление о ее происхождении и свойствах. На основе комплексного изучения данных, полученных оптическими и радиоастрономическими методами, были предложены

**Свойства лунной поверхности
по результатам астрономических и радиоастрономических
исследований**

Источник информации	Характеристика поверхности
Фотометрия	Высокопористая поверхность со сложной геометрической структурой
Поляризация	Мелкозернистая порода или непрозрачная тонкая пыль, частицы которой объединены в агрегаты
Инфракрасное излучение	Низкая теплопроводность и заметная пористость поверхностного слоя
Радиолокация	Поверхность слабоволнистая [с неровностями менее 1 м. Уклоны от 1 : 10 до 1 : 20. Низкая плотность поверхностного слоя
Радиоизлучение	Малая теплопроводность и высокая пористость пенистых образований, слагающих лунную поверхность
Альbedo*	0,05—0,18
Цвет*	Коричневато-серый или черновато-бурый

* Земные аналоги отсутствуют.

разнообразные гипотезы о формировании и строении вещества поверхностного слоя Луны.

2. ГИПОТЕЗЫ О ПРОИСХОЖДЕНИИ И СТРОЕНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛУНЫ

Большая работа по систематизации многочисленных гипотез и представлений о генезисе, строении и свойствах внешнего покрова Луны была проведена советскими учеными Н. П. Барабашевым и В. И. Езерским [12], А. В. Марковым [8,15], Е. Л. Рускол [16], Н. Н. Сытинской [9], В. С. Троицким и В. Д. Кротиковым [2], В. В. Шароновым [8, 17] и др.

До начала исследований лунной поверхности с помощью космических аппаратов были предложены следующие наиболее существенные гипотезы.

Гипотеза свежей скальной поверхности. Сторонники этой гипотезы считали, что, поскольку на Луне нет атмосферы, гидросферы, биосферы и, следовательно, отсутствуют процессы выветривания, лунная поверхность

должна состоять из свежей переработанной скальной породы [8, 18, 19].

Относительно состава лавового покрова мнения расходились. Одни полагали, что на Луне имеются магматические породы кислого состава, другие — основного.

Против гипотезы свежей скальной поверхности Луны были выдвинуты многочисленные возражения. Отмечалось, например, что сплошная твердая каменная порода более теплопроводна и окраска ее намного разнообразней и светлей, чем у материала верхнего покрова Луны. Поэтому эта гипотеза в чистом виде в последнее время почти никем не поддерживается.

Чаще высказывается предположение о ноздреватой структуре наружного слоя, сходной с застывшими лавовыми покровами на Земле, поверхность которых покрывается валами, ячейками, углублениями и порами. Допускается возможность разрушения и измельчения магматических пород [20]. Выказываются также предположения о наличии на Луне локальных выходов на поверхность коренных скальных пород или о присутствии маломощного (30—100 мм) покрова пыли на твердом скальном основании [8, 21].

Гипотеза образования осадочных горных пород. Предполагается, что на Луне могли присутствовать вода и атмосфера, которые впоследствии исчезли. После охлаждения Луны вода заполнила впадины морей, на дне которых и происходило накопление осадочных толщ.

Такая точка зрения на формирование поверхности Луны выдвигалась некоторыми исследователями [8], однако признания она не получила.

Гипотеза пылевого покрова. Согласно гипотезе, выдвинутой Голдом [22], основную роль в образовании лунной поверхности играют экзогенные факторы.

Гипотеза пылевого покрова советскими учеными никогда не поддерживалась [17]. В других странах, в частности в США, она признавалась наиболее вероятной и все работы, связанные с исследованиями Луны, выполнялись с учетом возможного присутствия на лунной поверхности мощных покровов пыли.

По мнению Голда, равнины морей представляют собой бассейны, заполненные пылью, толщина слоя которой может колебаться от нескольких метров до многих километров. В результате эрозии лунной поверхности происходит постепенное измельчение вещества лунных

скал и перенос продуктов денудации в пониженные места. Это вызывает постепенное разрушение и сглаживание горных образований. Одним из основных факторов дробления горных пород и накопления пыли, по мнению Голда, являются удары метеоритов, в частности микрометеоритов.

Принимая во внимание, что удары этих частиц наносятся с космическими скоростями, Голд считает, что суммарный эффект их действия на протяжении больших промежутков времени может быть весьма существенным.

Некоторое представление о процессах, происходящих при сверхскоростных ударах малых частиц о поверхности мишеней из твердых и сыпучих материалов, дают лабораторные опыты, которые ведутся в баллистических лабораториях с помощью специальных газовых пушек. При этом скорость полета пули достигает 8—10 км/сек. Большая часть опытов производится с металлическими пулями и мишенями, но в специальных исследованиях, связанных с изучением поверхности Луны, применялись мишени из базальта, гранита, пемзы, песка и искусственно созданные сверхрыхлые песчаные структуры.

Установлено, что форма кратера и количество выброшенного материала при ударе пули зависит от прочности, плотности и структуры материала мишени [5]. В металле кратер имеет форму полушаровидной выемки, окружен гребнем и диаметр его в несколько раз больше диаметра пули. В базальте кратер формируется аналогичным путем, но разрушение материала идет более интенсивно, объем кратера и, следовательно, количество выброшенного материала больше. При скорости полета пули 6,4 км/сек объем кратера в металле в 20 раз, а в базальте в 200 раз больше объема пули. При ударе по песчаной мишени объем выброса втрое больше, чем при ударе по базальту. Общая масса выброшенных частиц в случае использования мишеней из сыпучего материала примерно в 1000 раз больше массы ударяющей пули. Для пемзы это соотношение снижается до 40.

Крайне низкая теплопроводность поверхностного слоя Луны рассматривалась часто как довод в пользу пылевой гипотезы. В. С. Троицкий и В. Д. Кротиков [2] получили, однако, более высокое значение параметра k , который, по их мнению, соответствует очень пористым твердым веществам. В. Фирсов [23] также считает, что для объяснения низкой теплопроводности ма-

териала Луны достаточно, чтобы вещество лунной коры имело пемзообразное строение и плотность на 1—1,5 порядка меньше, чем плотность земной пемзы ($\rho = 0,6 \text{ г/см}^3$). По мнению А. В. Маркова [8], «даже простое геоморфологическое изучение некоторых горных хребтов и морей с трещинами говорит, что это не может быть слой пыли».

Гипотеза рыхлых связных структур. Гипотеза рыхлого несвязного пылевого покрова большой толщины в последнее время не поддерживается даже ее автором Голдом.

Большинство исследователей — Хапке и Ван Хорн [10], Уоррен [11], Голд [24] и др. — пришли к следующему выводу: поверхностный слой состоит из мелкодисперсных пылеватых частиц, образованных ударами метеоритов и спаянных между собой в местах контактов вследствие высокой чистоты граней и действия космической радиации. Структура такого рода напоминает смерзшийся сухой снег. Пыль, оседая в местах накопления, цементируется и превращается в дендритные сверхрыхлые структуры, обладающие свойствами твердого тела.

В дальнейшем прочность этих структур возрастает в результате воздействия протонной и электронной бомбардировки «солнечного ветра». В месте удара протона происходит локальное разогревание малого участка поверхности, вызывающее испарение атомов и молекул, которые через некоторое время оседают и цементируют окружающее вещество.

Пылевой слой может быть очень рыхлым с поверхности и более плотным в глубине. Уплотнение его возможно в результате воздействия микрометеоритов и собственного веса вышележащих толщ. Лабораторные опыты Хапке [5], проведенные с минеральным порошком из дунита (крупность зерен 10 $\mu\text{к}$), прокаленным в атмосфере аргона, показали, что в лунных условиях объемный вес пыли на поверхности должен быть примерно равен $0,35 \text{ г/см}^3$, на глубине 1 м — $0,6\text{—}0,8 \text{ г/см}^3$, на глубине — 10 м — $0,8\text{—}1 \text{ г/см}^3$.

Гипотеза слоя грубообломочного минерального материала, возникшего в результате метеоритной бомбардировки. Сторонники этой гипотезы считают, что формирование лунного рельефа происходит главным образом под действием ударов метеоритов [5, 16]

При ударе метеорита с космической скоростью происходит выброс материала поверхности, в результате чего образуется слой грубообломочного и пылевого вещества.

По расчетам Сэлисбери и Смолли [5], осредненная толщина обломочного слоя в области лунных морей равна 12,5 м, но, поскольку 95% выброшенной породы концентрируется у гребня кратера, междукратерное пространство должно быть покрыто слоем обломков толщиной в среднем 63 см. Максимальная толщина грубообломочного слоя может измеряться десятками и сотнями метров, особенно в непосредственной близости от кратеров.

Строение этого слоя неоднородно по глубине и по простиранию вследствие повторных ударов метеоритов и крупных глыб, выброшенных из соседних кратеров, а

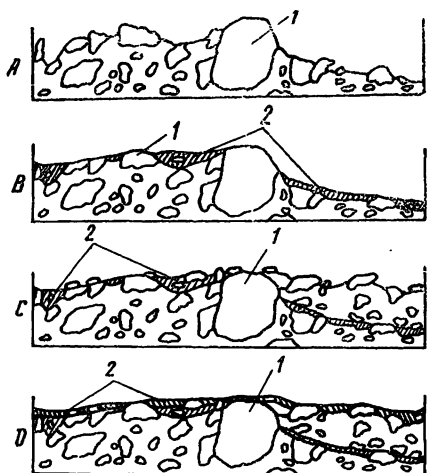


Рис. 3. Стадийное развитие обломочных и пылевых слоев на поверхности Луны (выравнивание рельефа)

1 — обломочный материал;
2 — слой пыли

также оседания пыли. В крупнообломочном слое наряду с очень большими глыбами (4,5—22 м) должны встречаться камни, щебень, песок и пыль всех фракций, залегающие пестро перемешанными слоями. На поверхности везде лежит слой рыхлого легкого пористого материала Луны. Продолжающиеся все время удары крупных метеоритов постоянно деформируют уже сложившуюся толщу. В результате крупнообломочные пласты переслаиваются с пылевыми и разрез в целом приобретает сложное строение (рис. 3).

Гипотеза покрова из метеоритного материала. Предполагается, что процессы денудации на поверхности Луны отсутствуют и, следовательно, происходит постепенное накопление падающих на лунную поверхность метеоритов [8]. При этом образуется сплошной покров метеоритного вещества, толщина которого может достигнуть 1 см за 10^9 лет. Однако в этом случае исчезли бы все различия альbedo и цвета, наблюдаемые на лунной поверхности. Поэтому Л. Н. Радлова считает, что верхний покров не сплошной и местами наблюдаются выходы коренных горных пород. В. В. Шаронов придерживался мнения, что в процессе падения метеоритов происходит измельчение горных пород поверхности и космический материал приобретает окраску, связанную с цветовыми особенностями местности.

Метеорно-шлаковая гипотеза. Эта гипотеза была предложена и наиболее полно разработана Н. Н. Сытинской [9], которая использовала результаты фотометрических и колориметрических исследований поверхностного слоя Луны и земных горных пород. Согласно этой гипотезе падение метеорита вызывает взрыв, при котором большое количество коренной горной породы в месте взрыва обращается в пар. В результате оседания испаренного вещества происходит формирование породы, имеющей очень рыхлое, ноздреватое, губчатое строение, напоминающее в земных условиях сильнопузырчатую спекшуюся массу типа вулканического шлака. Размеры неровностей должны быть порядка нескольких миллиметров или сантиметров.

Некоторые возражения против метеорно-шлаковой гипотезы были выдвинуты Н. П. Барабашевым [12] и А. В. Марковым [25], которые указывали, в частности, что образование коры плавления маловероятно, так как в этом случае должна возникать сильная поляризация, что противоречит данным наблюдений.

В то же время А. В. Марков, признавая возможность формирования такой поверхности, писал, что «если справедлива метеорно-шлаковая гипотеза, то внешний слой лунной породы окажется с более твердой подложкой, чем в случае гипотезы слоя порошка» [8].

Анализ результатов исследования лунной поверхности оптическими и радиоастрономическими методами позволяет сделать следующие выводы.

Единой и окончательно обоснованной точки зрения

на происхождение, состав и физические свойства материала верхнего покрова Луны не существует.

Высказываются предположения о различных образованиях на поверхности Луны, сводная характеристика которых приведена в табл. 3.

Таблица 3

Основные гипотезы строения поверхности Луны

Исследователи	Краткое содержание гипотезы
1. Лоуренс и Дэтт, Койпер, Барабашев	Сплошные покровы или местные выходы непереработанных изверженных лав; лава, подвергшаяся эрозии—слой крупных остроко- нечных обломков горных пород (мощность эродированного слоя от 1,5 до 15 м и бо- лее); твердая скалистая поверхность и мест- ные выходы скальных пород, покрытые сло- ем пыли небольшой толщины (от нескольких до 100 мм).
2. Кларксон	Поверхность сложена осадочной толщей, образованной на дне впадин морей, заполнен- ных в прошлом водой.
3. Голд	Поверхность покрыта слоем несвязной пы- ли большой толщины (от нескольких метров до нескольких километров). Пыль может стекать в понижения и переноситься на бо- льшие расстояния. Плотность пылевых отло- жений чрезвычайно мала.
4. Голд, Ван Хорн и Хапке, Уоррен	Поверхностный слой (мощностью от неск- ольких миллиметров или сантиметров до нескольких метров) состоит из мелкодиспер- сных пылеватых частиц, спаянных между со- бой в местах контактов благодаря высокой чистоте граней и действию космической ра- диации. Плотность пылевого слоя очень ма- ла и увеличивается с глубиной.
5. Сэлисбери и Смол- ли, Рускол	На поверхности лежит слой грубообломоч- ного, зернистого и пылевого материала, воз- никший в результате метеоритной бомбарди- ровки. Строение слоя сложное, состав пест- рый. Сверху—слой пыли, определяющий оп- тические свойства поверхности. Средняя мощ- ность слоя в области морей 60 см, в горах около 14 м, максимальная измеряется деся- тками и сотнями метров.
6. Шаронов, Радло- ва	Отсутствие процессов денудации вызывает накопление падающих на лунную поверхность метеоритов. За 10^9 лет мощность слоя мо- жет достигнуть 1 см.

Исследователи	Краткое содержание гипотезы
7. Сытинская, Троцкий и Кротиков	Поверхность сложена твердой пенистой, пористой или губчатой породой, плотность которой увеличивается с глубиной. Верхние слои имеют объемный вес порядка $0,5 \text{ г/см}^3$ и пористость 90%. Под пористой толщей лежат твердые скальные породы.

Плотность грунтов поверхностного слоя Луны мала и составляет менее 1 г/см^3 .

Большое значение селенологами США придавалось возможному существованию на Луне мощных пылевых покровов, обладающих в поверхностном слое чрезвычайно рыхлой структурой, ничтожно малой плотностью и низкой механической прочностью.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Новым этапом в изучении Луны явились полеты советских автоматических станций, с помощью которых выполнялся комплекс научных измерений и фотографирование Луны из космического пространства и непосредственно с лунной поверхности. Съемка Луны проводилась также американскими космическими аппаратами типа «Рейнджер», на которых телефотографирование выполнялось при подлете аппарата к Луне. Затем были осуществлены полеты орбитальных аппаратов «Лунар-Орбитер» и возвращающихся на Землю кораблей «Зонд».

Данные об основных этапах изучения лунной поверхности и окололунного пространства с помощью космических аппаратов за период с января 1959 г. по июль 1969 г. приведены в табл. 4.

Новые сведения о характере лунной поверхности были получены главным образом в результате крупномасштабного фотографирования Луны.

Рассмотрим полученные результаты.

С помощью станций «Луна-3» и «Зонд-3» были впервые получены изображения невидимой стороны Луны.

Основные этапы изучения Луны и окололунного пространства с помощью космических аппаратов

(январь 1959 г. — июль 1969 г.)

Автоматическая станция	Дата	Цель полета и основные научные исследования
«Луна-1»	2 января 1959 г. (запуск)	Автоматическая станция прошла вблизи Луны и стала первой искусственной планетой солнечной системы. На станции установлена научная аппаратура для изучения газовой компоненты межпланетного вещества и корпускулярного излучения Солнца, измерения магнитного поля Луны, изучения метеорных частиц, регистрации тяжелых ядер в первичном космическом излучении и др.
«Луна-2»	12 сентября 1959 г. (запуск)	Автоматическая межпланетная станция (АМС) впервые достигла поверхности Луны (Море Дождей). Научная аппаратура примерно такая же, как на АМС «Луна-1»
«Луна-3»	4 октября 1959 г. (запуск)	Автоматическая межпланетная станция совершила облет Луны и впервые сфотографировала ее обратную сторону с расстояния 65,2—68,4 тыс. км. На станции был установлен большой комплекс разнообразной аппаратуры, в частности фототелевизионная система, предназначенная для фотографирования Луны и передачи полученного изображения на Землю, а также комплекс научной аппаратуры для проведения физических измерений в космическом пространстве
«Рейнджер-7»	28 июля 1964 г. (запуск)	Космический аппарат (КА) был направлен в сторону Луны и за 17 мин 13 сек до столкновения с ней начал передавать изображения лунной поверхности на Землю. Всего было получено 4316 изображений. На аппарате было установлено шесть телевизионных камер: две — для получения широкоугольных фотографий, а четыре — для съемки малых площадей

Автоматическая станция	Дата	Цель полета и основные научные исследования
«Рейнджер-8»	17 февраля 1965 г. (запуск)	Космический аппарат достиг Луны в районе Моря Спокойствия и врезался в поверхность; до удара о лунную поверхность передал свыше 7000 снимков
«Рейнджер-9»	21 марта 1965 г. (запуск)	Космический аппарат был запущен для фотографирования внутренней части Кратера Альфонс. При полете к лунной поверхности передал 5814 изображений
«Зонд-3»	18 июля 1965 г. (запуск)	Автоматическая станция пролетела мимо Луны и завершила фотографирование ее обратной стороны. Помимо фототелевизионной аппаратуры станция была оснащена научной аппаратурой для изучения магнитных свойств околоземного космического пространства и межпланетной среды, солнечного ветра, низкочастотного радиоизлучения Галактики, метеороидов, космических лучей, а также для исследования инфракрасных и ультрафиолетовых спектров лунной поверхности
«Луна-9»	3 февраля 1966 г. (посадка)	Автоматическая лунная станция (АЛС) впервые совершила мягкую посадку на лунную поверхность в районе Океана Бурь и передала изображение лунного ландшафта на Землю
«Луна-10»	3 апреля 1966 г. (выведена на орбиту)	Автоматическая лунная станция—первый искусственный спутник Луны—была оснащена сложным комплексом научной аппаратуры для уточнения величины возможного магнитного поля Луны, измерения гравитационного поля, изучения химического состава ее поверхности, радиационной обстановки в околоземном пространстве и др. На станции были установлены: магнитометр (чувствительность его в 15 раз превышала чувствительность магнитометра АМС «Луна-2»), ловушка заряженных частиц модуляционного типа, две четырехэлектродные ловушки, два счетчика заряженных частиц, многоканальный сцинтилляционный гамма-спектрометр, счетчики фотонов, два торцовых газоразрядных счетчика и др.

Автоматическая станция	Дата	Цель полета и основные научные исследования
«Луна-11»	24 августа 1966 г. (запуск)	Автоматическая лунная станция—второй искусственный спутник Луны,—оснащенная аппаратурой для исследования окололунного пространства, провела определение диэлектрической постоянной грунта Луны
«Луна-12»	22 октября 1966 г. (запуск)	Автоматическая лунная станция—третий искусственный спутник Луны,—оснащенная аппаратурой для исследования окололунного пространства, провела анализ рентгеновского излучения Луны и сфотографировала лунную поверхность с разрешением 15—20 м
«Лунар-Орбитер-1»	10 августа 1966 г. (запуск)	Орбитальные аппараты — искусственные спутники Луны—были оснащены фототелевизионной аппаратурой с большой разрешающей способностью. С помощью этих аппаратов была отснята большая часть поверхности Луны. В 99% снимков достигнуто разрешение 150 м, а на отдельных снимках — 1 м. Кроме того, изучались диэлектрические и магнитные свойства поверхности, гравитационное поле и микрометеориты в окололунном пространстве
«Лунар-Орбитер-2»	6 ноября 1966 г. (запуск)	
«Лунар-Орбитер-3»	5 февраля 1967 г. (запуск)	
«Лунар-Орбитер-4»	4 мая 1967 г. (запуск)	
«Лунар-Орбитер-5»	1 августа 1967 г. (запуск)	
«Луна-14»	7 апреля 1968 г.	Автоматическая лунная станция — искусственный спутник Луны — провела изучение гравитационного поля, уточнение соотношения масс Луны и Земли, измерение потоков заряженных частиц, идущих от Солнца и космических лучей, и др.

Автоматическая станция	Дата	Цель полета и основные научные исследования
«Зонд-5»	15 сентября 1968 г. (запуск)	Автоматическая космическая станция провела отработку процесса возвращения из космоса на Землю беспилотного варианта пилотируемого лунного корабля, фотографирование Земли из космоса, изучение микрометеоритов, а также биологические и радиационные исследования. Спуск баллистический
«Зонд-6»	10 ноября 1968 г. (запуск)	Автоматическая станция провела отработку процесса возвращения из космоса на Землю беспилотного варианта пилотируемого лунного корабля, фотографирование Луны и Земли с высокой разрешающей способностью, а также биологические, радиационные и микрометеоритные исследования. Спуск с использованием аэродинамического качества
«Луна-15»	17 июля 1969 г. (вывод на селеноцентрическую орбиту)	Автоматическая лунная станция—искусственный спутник Луны—провела отработку новых систем собственной станции, а также исследования окололунного космического пространства

Примечание. Данные о работе автоматических лунных станций «Луна-13» и «Сервейер», совершивших мягкую посадку на Луну и проводивших там комплекс научных исследований, приведены в п. 5.

Фотоснимки показали, что образования, расположенные на обратной стороне Луны, не отличаются по природе и структуре от деталей, расположенных на видимой ее стороне. Поверхность обратной стороны Луны отличается тем, что имеет меньше морей и значительные площади, покрытые кратерами и кольцевыми горами [7].

Для обсуждения результатов фотосъемки Луны аппаратами «Рейнджер-7», «Рейнджер-8» и «Рейнджер-9» в США была созвана специальная конференция [26]. Детали, обнаруженные на снимках, рассматривались на конференции Голдом с точки зрения его пылевой гипотезы, так как он по-прежнему считал, что поверхность Луны покрыта тонкой пылью, которая под поверхностью может быть сцементирована. Шумакер сравнил поверхность Луны с сырым песком. Г. Юри и Б. Ю. Левин обнаружили на фотографиях признаки вулканической деятельности.

Руководитель эксперимента по фотографированию Луны Койпер [27] отстаивал свою точку зрения о том, что поверхность лунных морей представляет собой плоскую твердую лаву мощностью 20—200 м, эродированную космическими частицами. Поверхность Луны, по его мнению, лишена слоя «космической пыли», а покрыта, возможно, слоем колкого и хрупкого материала, напоминающего скрипучий снег. Глыбы и осколки пород, разлетающиеся на расстояние до 100 м от места выброса, образуют отдельные вторичные кратеры, лучевые системы и т. п., но не создают обломочно-пылевого покрытия.

Джаффе [28] сопоставил изображения лунных кратеров на снимках «Рейнджер-7» с кратерами, полученными в лабораторных условиях с песками трех групп (по размерам частиц). В результате им был сделан следующий вывод: слой гранулированного материала на поверхности Моря Познанного имеет толщину не менее 5 м, а в случае, когда вещество обладает заметной адгезией, значительно превосходит эту цифру.

После полета «Рейнджер-9» Уоткинс писал, что подтвердились данные «Рейнджер-7» и «Рейнджер-8» о полном или почти полном отсутствии кристаллических пород, которые могли бы образоваться из жидкой лавы. Вследствие отсутствия скал Лумис считал, что, возможно, Луна покрыта слоем (9—12 тыс. м) зернистого материала, близкого к песку [29].

Таким образом, несмотря на то, что с помощью аппаратов типа «Рейнджер» было получено большое количество снимков лунной поверхности, единая точка зрения о структуре и генезисе лунного грунта все же не была достигнута.

3 февраля 1966 г. впервые была осуществлена мягкая посадка на Луну советской автоматической станции «Луна-9». Были переданы круговые панорамы лунного ландшафта, причем вблизи станции на снимках различимы детали размером около 1—2 мм (рис. 4).

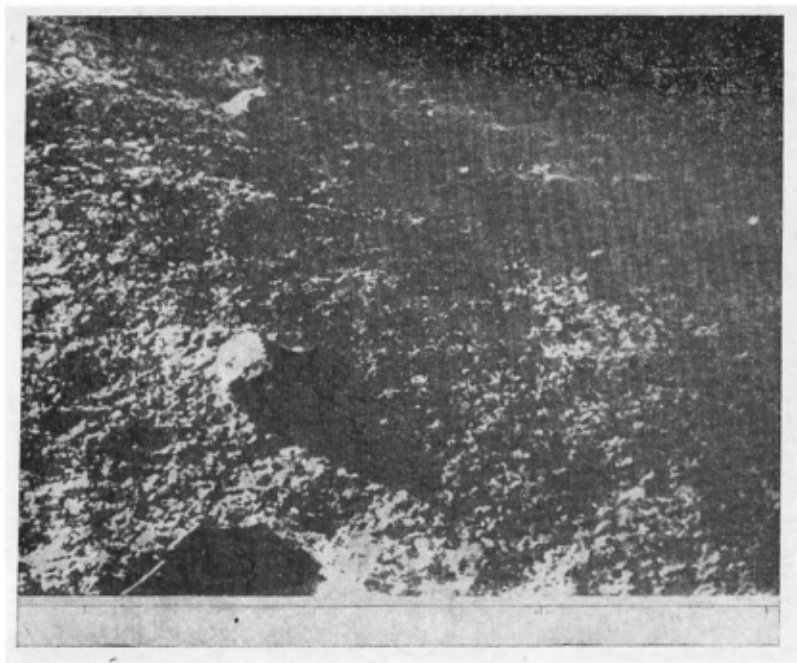


Рис. 4. Панорама лунной поверхности, переданная автоматической лунной станцией «Луна-9»

Рельеф в районе посадки станции сравнительно ровный, поверхность достаточно твердая, шероховатая и имеет много мелких углублений и бугорков, следов пыли не обнаружено, разбросаны отдельные образования типа камней.

По мнению А. И. Лебединского, материал лунной поверхности в месте посадки станции подвергался многократной переработке. Он дробился в результате бомбардировки метеоритами, затем объединялся в твердую породу диффузионным вакуумным слипанием, растрескивался из-за резких изменений температуры при смене дня и ночи и особенно при солнечных затмениях, дробился, объединялся и вновь растрескивался. И все это повторялось много раз за многие сотни миллионов лет, в результате чего возникла пористая, как евпаторийский желтый песчаник, или, вернее, даже более пористая твердая, но непрочная порода.

На основе анализа панорам, воспроизведенных станцией «Луна-9», и с учетом всех ранее полученных результатов К. П. Флоренский [30] пришел к выводу, что можно выделить три слоя, слагающих грунт Луны:

- 1) поверхностный, определяющий оптические характеристики поверхности;
- 2) промежуточный, соответствующий радиофизическим данным;
- 3) скальное основание.

Верхний слой, по мнению К. П. Флоренского, представляет собой сильно «изъеденную» поверхность губчатого (дендритного) строения. Так как в процессе образования участвуют мельчайшие пылевые частицы, то, по-видимому, имеет место избирательная их ориентировка при осаждении под влиянием электростатических сил с образованием хлопьевидной структуры типа сажи, усложняющей первичную структуру «разъедания». Гранулометрический состав этого слоя очень неоднороден. Общая мощность поверхностного слоя колеблется в зависимости от свежести поверхности и изменяется от 1 до 3 см.

Мощность промежуточного слоя 6 ± 2 м с переменной плотностью вещества в среднем $0,8 \pm 0,3$ г/см³. Структура спекания очень неправильных обломков, частично пенистых, хрупка. Внутренние связи жесткие.

Фотоснимки, полученные станцией «Луна-9», тщательно анализировались американскими учеными, которые отметили высокое качество фотографий. Койпер писал, что материал поверхности Луны — пенистая высокопористая лава типа пемзы — образован в условиях глубокого вакуума; 95% этой поверхности составляют поры и лишь 5% — силикаты. Пылевой слой на поверх-

ности Луны отсутствует. Джаффе заявил, однако, что полученные на фотографии данные не опровергают гипотезы пыли. Шероховатая поверхность в месте посадки состоит, по его мнению, из грубой пыли.

В результате орбитальных полетов космических аппаратов «Лунар-Орбитер» и «Зонд-6» были получены дополнительные сведения о рельефе Луны, характере неровностей верхнего покрова, распределении камней и лунок на поверхности и т. д. Однако даже после изучения крупномасштабных снимков лунной поверхности мнения большинства исследователей о происхождении и структуре самого верхнего слоя Луны оставались противоречивыми. Грунт в месте посадки автоматической лунной станции определялся одними исследователями как весьма рыхлый пылевидный материал, в то время как другие отмечали наличие лавовых образований. К гипотезе мощного пылевого покрова даже американские исследователи стали относиться более критично, хотя присутствие на Луне пылевых отложений полностью и не исключалось.

4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ЛУННЫЕ ГРУНТЫ

Обзор советской и зарубежной литературы показывает, что гипотетические данные о механических свойствах лунных грунтов (до проведения специальных экспериментов на поверхности Луны) совершенно недостаточны и к тому же весьма противоречивы. Встречаются самые разнообразные оценки вероятной несущей способности натуральных грунтов (табл. 5), поскольку характеристика свойств ведется различными исследователями с точки зрения принятых ими гипотез формирования лунного грунта.

С помощью астрономических и радиоастрономических методов исследования удастся вычислить только предполагаемую плотность грунта и составить некоторое представление о структуре его поверхности. Опубликованные материалы не содержат сведений о твердости, угле внутреннего трения, сцеплении и сжимаемости лунных грунтов.

Как видно из табл. 5, при составлении в США многочисленных проектов изучения и освоения Луны («Сервейер», «Аполлон» и др.) принимались чрезвычайно ма-

лые величины несущей способности грунта поверхностного слоя — пыли. Как показали исследования, несущая способность такой пыли невелика из-за небольшого числа контактов в единице объема и малой площади каждого контакта.

На конференции НАСА в 1965 г. возникли резкие разногласия по вопросу о несущей способности поверхностных грунтов. Названную Койпером величину 1 кг/см^2 большинство участников конференции признало завышенной.

Недостаток сведений о механических свойствах лунной поверхности значительно усложняет решение ряда технических вопросов, связанных с мягкой посадкой на Луну космических аппаратов, передвижением по поверхности транспортных средств и космонавтов, а также разработкой грунта и строительством. В связи с этим большое значение придается определению физико-механических характеристик грунта непосредственно на поверхности Луны.

По планам американских исследований, инструментальную разведку Луны предполагалось провести в 1965—1966 гг. Поэтому уже в начале 60-х годов были выполнены первые лабораторные исследования механических свойств моделей лунных грунтов. Это было необходимо для расшифровки результатов предстоящих измерений на поверхности Луны, а также для выявления основных закономерностей работы грунта под нагрузкой в лунных условиях.

Таблица 5

Данные о предполагаемых механических свойствах лунных грунтов

Автор сообщения или название исследовательской организации	Характеристика механических свойств грунтов
Рекс Гудьер Тайр энд Раббер Проект «Апполон»	Несущая способность грунта $0,007 \text{ кг/см}^2$, принятая при проектировании колес лунных транспортных средств в «Дженерал Моторс». Верхний слой поверхности достаточно прочен, чтобы выдержать посадку лунного экспедиционного модуля Несущая способность грунта $0,07 \text{ кг/см}^2$ Несущая способность грунта $0,07 \text{ кг/см}^2$ при глубине вдавливания 10 см. Несущая способность грунта $0,84 \text{ кг/см}^2$ при глубине вдавливания 60 см

Автор сообщения или название ис- следовательской организации	Характеристика механических свойств грунтов
Флюгвельт- Интернат	Несущая способность грунта (согласно расшифровке фотоснимков) в районе Кратера Альфонс $1,1-2,2 \text{ кг/см}^2$
Проект «Сер- вейер» Торман	Коэффициент постели $0,15 \text{ кг/см}^3$
Проект «Сер- вейер» НАСА	Различные грунты, начиная от твердой скалы с пределом прочности на сжатие $280-1750 \text{ кг/см}^2$ до мягкого грунта с несущей способностью $0,7 \text{ кг/см}^2$ при глубине вдавливания 30 см Твердость поверхности может изменяться от твердой скалы до мягкого дерева
Хилд	Предполагается, что несущая способность грунтов равна: пылевидных— $0,084 \text{ кг/см}^2$, пористых— $1,4 \text{ кг/см}^2$, плотных твердых— $2,8 \text{ кг/см}^2$ На глубине до 1 м несущая способность равна $0,063 \text{ кг/см}^2$, предел прочности на сжатие составляет $0,42 \text{ кг/см}^2$.
Койпер Джаффе	На глубине $1-4 \text{ м}$ указанные величины соответственно равны $0,35 \text{ кг/см}^2$ и $2,8 \text{ кг/см}^2$ Несущая способность поверхностного слоя 1 кг/см^2 По высотам валов кратеров, снятых КА «Рейнджер-7», и по крутизне их склонов нижний предел прочности насыпного слоя, глубина которого определена автором приближенно равной 5 м , принимается в интервале $0,01-0,1 \text{ кг/см}^2$
Нормал Филдер	Прочность поверхности $0,3-0,7 \text{ кг/см}^2$ Грунт в районе посадки АЛС «Луна-9» достаточно прочен, чтобы выдержать вес человека
Голд и Хапке	Отсутствие сильного погружения АЛС «Луна-9» в грунт показывает, что он способен выдержать статическую нагрузку, равную $0,007 \text{ кг/см}^2$
Г. А. Лейкин	Несущая способность грунта по снимкам КА «Рейнджер-9» $1-1,4 \text{ кг/см}^2$
К. П. Фло- ренский	Механическая прочность поверхностного слоя ($\sim 3 \text{ см}$) может быть очень мала. Прочность точечных контактов достаточно велика и может приближаться к прочности кристаллической решетки.
Найк	Прочность промежуточного слоя ($6\pm 2 \text{ м}$) как минимум определяется способностью выдержать вес АЛС, а также удар камней, выпавших на его поверхность. Можно считать, что прочность этого слоя не менее десятков килограмм на 1 см^2 Несущая способность поверхности соответствует трем моделям поверхности: а) покрытой слоем пыли; б) покрытой обломками твердых скальных пород; в) твердой каменной гладкой, покрытой тонким слоем пыли

С помощью сложной и дорогостоящей аппаратуры на разнообразных моделирующих материалах (горные породы, минералы, искусственные образцы) изучалось влияние уменьшенной силы тяжести, вакуума и радиации на физико-механические свойства лунных грунтов.

К настоящему времени в различных научно-исследовательских центрах США выполнен ряд экспериментальных работ по изучению механических свойств моделирующих материалов. Появились первые обзорные материалы в США Митчелла [31] и Джонсона [32], а в СССР И. И. Черкасова [33], посвященные этому вопросу.

Результаты некоторых исследований, опубликованные в периодической печати и в специальных отчетах, излагаются ниже.

Халаджаном исследовано влияние гравитационного поля на угол естественного откоса, несущую способность и пористость зернистых грунтов [5].

В работе показано, что угол естественного откоса несвязного сыпучего грунта на Земле и на Луне должен быть одинаковым. При наличии сцепления между частицами угол естественного откоса одного и того же грунта на Луне больше, чем на Земле, а если между частицами возникнет электростатическое отталкивание, как считает Голд, то откос будет более пологим.

Для изучения влияния ускорения силы тяжести на несущую способность зернистых материалов Халаджаном в самолете, двигавшемся по специальным траекториям, было произведено вдавливание в грунт пенетromетра, причем ускорение, действовавшее на пенетromетр и грунт, изменялось от $0,1g$ до $3g$. Штамп пенетromетра был прямоугольным, размером в плане 89×22 мм. Грунты — свинцовая дробь крупностью 3 мм и песок средней крупности с размером частиц 0,3 мм в плотном состоянии, а также молотая пемза средней крупностью зерен 0,04 мм в рыхлом состоянии. Оказалось, что глубина погружения пенетromетра в дробь и песок невелика по абсолютному значению и обратно пропорциональна действующему ускорению (рис. 5). Установлено, что глубина погружения в рыхлую молотую пемзу не зависит от ускорения.

Неоднократно высказывалось предположение о том, что осадочные породы вследствие меньшей силы тяже-

сти на Луне должны обладать большой пористостью, так как падение частиц происходит с меньшей скоростью.

Для выяснения влияния скорости падения на плотность осадка Халаджаном были проведены опыты с оседанием суспензии молотого базальта и молотого кварца в воде, а также в растворе бромистого цинка, удельный вес которого был равен $2,42 \text{ г/см}^3$. При этих условиях на оседающие частицы действовало ускорение в

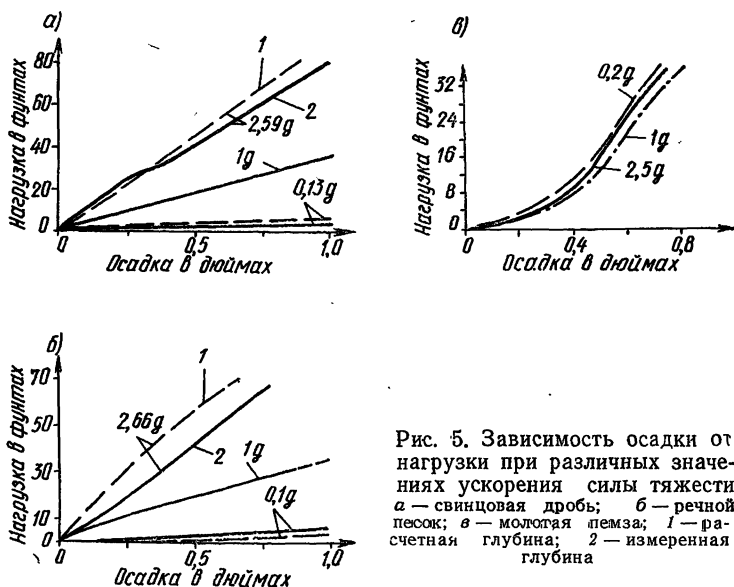


Рис. 5. Зависимость осадки от нагрузки при различных значениях ускорения силы тяжести а — свинцовая дробь; б — речной песок; в — молотая лемза; 1 — расчетная глубина; 2 — измеренная глубина

воде, равное $2/3g$, а в растворе бромистого цинка, равное $1/6g$. Опыты показали, что молотый базальт, а также кварцевый песок в обоих случаях образовывали осадки одинаковой плотности; следовательно, уменьшение силы тяжести само по себе не может привести к увеличению пористости осадочных грунтов.

Однако на Луне действуют другие факторы, которые благоприятствуют этому. Эксперименты Вея и Нельсона [34] показали, например, что пористость, полученная при осаждении частиц грунта в низком вакууме (от 1 до 10^{-3} мм рт. ст.), меньше, чем пористость, полученная в атмосфере. Однако в высоком вакууме пористость увеличивалась с ростом его величины, а в случае осаж-

дения порошка кремнезема при вакууме 10^{-7} мм рт. ст. была больше, чем при осаждении в атмосфере.

Рядом исследователей были выполнены эксперименты по изучению влияния вакуума на механические свойства зернистых материалов.

В условиях лунного вакуума поверхность минеральных частиц лунных грунтов должна быть совершенно свободной от адсорбционных слоев влаги, газов и окислов. Между соприкасающимися частицами сразу же возникает сцепление и создается возможность образования чрезвычайно рыхлых конденсационных структур. Предельно плотная упаковка шаров одного диаметра без сцепления между ними достигается в земных условиях в том случае, когда каждый шар соприкасается с двенадцатью другими, а предельно рыхлая — при соприкосновении с четырьмя окружающими шарами. Но при наличии сильного сцепления вполне возможно образование структуры, в которой каждый шар соприкасается только с двумя смежными, т. е. возникает нить.

Штейн и Джонсон [5] специальными опытами показали, что слой минерального тонкозернистого порошка, насыпанного в вакууме на пластинки из камня, стекла и меди, способен удерживаться на перевернутой пластинке вследствие действия сил сцепления.

Опыты проводились в вакуум-камере, внутри которой было смонтировано ударное приспособление, позволявшее резко встряхивать шлифованную пластинку с насыпанным на ней слоем порошка.

После окончания откачки газа по пластинке наносился удар и ее ускорение регистрировалось осциллографом. Удары повторялись с возрастающей силой, пока все зерна не стряхивались с пластинки. Адгезия зерен вычислялась по максимальному ускорению, которое удалось определить с точностью до 0,5g.

Подобным образом определялись силы сцепления оливиновых и обсидиановых порошков при давлении в камере от $6,3 \cdot 10^{-10}$ до $1,3 \cdot 10^{-9}$ мм рт. ст. Порошки нагревались до 100°C в течение 24 ч. Оказалось, что для полного очищения пластинок от порошка необходимо было развить ускорение до 12g, т. е. сила сцепления в 12 раз превышала вес частицы. Напряжение отрыва частицы порошка от поверхности пластинки из того же материала по площади их контакта оказалось близким 90 кг/см^2 , что равно пределу прочности на разрыв ис-

ходного материала. В другой серии опытов с более тонкими порошками напряжение отрыва в контакте составило 160 кг/см^2 . Несмотря на грубую методику опытов и условную обработку их результатов, следует признать, что авторам удалось весьма наглядно показать возникновение значительных сил сцепления между минеральными частицами.

Однако площадь каждого контакта соприкасающихся частиц очень мала и, например, для частиц диаметром 5 мк составляет всего $2,3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ и вмещает только около 50 атомов. Поэтому несмотря на большую силу сцепления, суммарная предельная нагрузка на контакт невелика.

Элисбери и другими исследователями [35] изучалось поведение порошков различных горных пород в сверхвысоком вакууме и при нормальном атмосферном давлении. Порошки рассеивались по фракциям с величиной зерен менее 3, 17 и 70 мк.

Эксперименты показали, что в высоком вакууме под влиянием молекулярного притяжения в точках соприкосновения между упругими сферическими частицами силы сцепления достигают $3 \cdot 10^8 \text{ дин/см}^2$. В среднем по сечению силы сцепления равны 750 дин/см^2 .

На Луне грунты не содержат воду, поэтому такие явления, как капиллярная связность, поровое давление, набухание и усадка, совершенно исключены.

Главным фактором взаимодействия между крупными частицами и обломками в лунных условиях является сухое трение в контактах. Коэффициент сухого трения между зернами на Луне должен изменяться в более широких пределах, чем на Земле, и в общем быть значительно более высоким.

В Принстонском университете [5] были поставлены опыты для выяснения влияния вакуума и удаления адсорбированных газов на трение между шариками из бариевого кронгласса, никелевой дроби диаметром 4,4 мм и кварцевыми пластинками.

Исследования проводились на установке для сдвига в вакууме. Установка помещалась в камере из нержавеющей стали диаметром 20 см и высотой 15 см.

В камере был установлен цилиндрический алюминиевый контейнер диаметром 6,25 см и высотой 3,8 см, верхняя половина которого была укреплена неподвижно, а нижняя сдвигалась с помощью электродвигателя.

В нижней половине был смонтирован электронагреватель.

Поскольку коэффициент трения определялся исходя из предела прочности системы шаров на сдвиг, предварительно были выведены формулы зависимости между пористостью системы, углом трения и коэффициентом сухого трения шаров.

Опыты производились при атмосферном давлении и в вакууме порядка 10^{-5} — 10^{-6} мм рт. ст., который создавался в течение 12 ч. При этом образец медленно нагревался до заранее заданной температуры. Сдвиг производился при максимальной температуре (190—250°C) или после охлаждения образца до комнатной температуры. Пористость системы шаров составляла 38%. Наружное давление на образцы осуществлялось грузами весом 1,65; 2,1 и 2,2 кг. Опыты показали, что коэффициент трения для стеклянных шаров и кварцевых пластинок изменяется в зависимости от величины вакуума. Увеличение коэффициента трения в вакууме было установлено также и для никелевых шаров.

Результаты аналогичных опытов были опубликованы Хиллом и Какмаком [36], которые исследовали влияние вакуума на величину силы сдвига идеального гранулированного материала — стекла, алюминия и стали; диаметры их зерен не превосходили 2,5 мм. Пористость материала составляла 40%, минимальное давление в каждом опыте было $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Опыты подтвердили, что увеличение сопротивления сдвигу по мере увеличения внутреннего трения происходит примерно по экспоненте; сила сдвига гранулированного материала является функцией давления и заметно возрастает при очень низких давлениях.

Вей и Нельсон [34] выполнили эксперименты по определению физико-механических свойств грунтов, присутствие которых возможно на лунной поверхности.

В опытах использовался порошок трех типов с размерами частиц от 0,7 до 60 мк; вакуум составлял 10^{-10} мм рт. ст.

Сдвиговые испытания показали, что кажущееся сцепление и внутреннее трение порошка кремнезема увеличиваются в условиях вакуума (рис. 6). Внутреннее трение оливина также увеличивалось в вакууме, но его кажущееся сцепление уменьшалось. В результате авторы пришли к выводу, что влияние вакуума на ца-

параметры сдвига грунтов зависит от минералогического состава частиц.

В работах, посвященных этим исследованиям, отмечалось, что данные экспериментов Вея и Нельсона нельзя использовать для оценки механических свойств лунных грунтов без значительных поправок. Указывалось, в частности, что авторы преувеличивают влияние минералогического состава на сдвиговые характеристики исследуемых материалов, не приводят показателей поверхностных свойств частиц и степени загрязненности образцов.

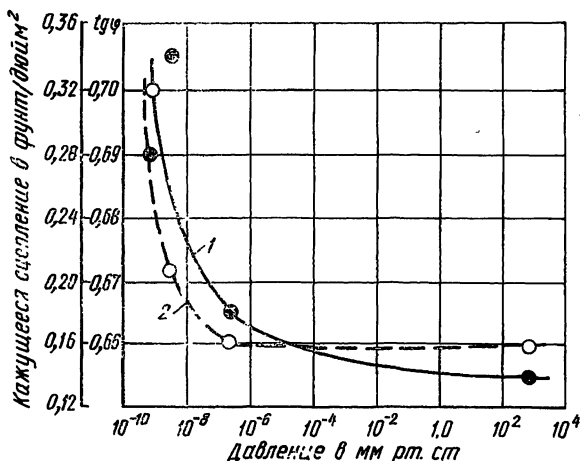


Рис. 6. Зависимость кажущегося сцепления 1 и внутреннего трения ($\text{tg } \varphi$) 2 порошка кремнезема от величины вакуума

Наряду со сдвиговыми испытаниями различными исследователями выполнялись лабораторные эксперименты в вакууме с применением статической и динамической пенетрации в моделирующие материалы.

Авиакомпания «Грумман» [5] опубликовала результаты статической пенетрации в тонкую молотую пемзу с зернами крупностью от 2 до 100 мк. Порошок предварительно нагревали в вакууме до 150°C в течение двух недель. Минимальное давление доводилось до 10⁻⁶—10⁻⁸ мм рт. ст. Опыты показали увеличение сопротивления пенетрации в вакууме. Данные о плотности материалов не были приведены.

Исследовательский фонд «Армур» [5] проводил в вакууме испытания по статической и динамической пене-трации в белый кварцевый порошок при различной пористости образцов с крупностью зерен от 2 до 40 *мк*. Порошок предварительно нагревали до 110°C в течение 18 ч и затем переносили в вакуум-камеру, где давление доводили до 10^{-7} *мм рт. ст.* Было установлено скачко-образное увеличение сопротивления статической пене-трации при снижении давления до 10^{-5} *мм рт. ст.* Дина-мическое сопротивление изменялось плавно и проявля-лось сильнее в плотных образцах.

Джаффе [5] провел опыты с применением статиче-ской и динамической пенетрации в минеральные порош-ки, приготовленные из вулканических базальтовых бомб. Объемный вес образцов изменялся от 1,14 до 2,29 *г/см³* при удельном весе базальта 2,97 *г/см³* и ис-ходной влажности 0,1%. Исследования проводились при нормальном атмосферном давлении, и в вакууме при разрежении 10^{-5} — 10^{-6} *мм рт. ст.*

Статическая пенетрация производилась круглыми штампами различных диаметров — 0,9; 1,4 и 2,8 *см*, при этом несущая способность минеральных порошков опре-делялась как удельное давление, при котором величина осадки равна его диаметру.

Динамическая пенетрация производилась цилиндри-ческими инденторами длиной 5 *см*, заостренными на ко-нус с углом при вершине 120°, и диаметрами 0,6 и 1 *см*. Скорость удара составляла 1,77 *см/сек*.

Джаффе установил, что при статическом нагружении несущая способность в вакууме не увеличивается и за-висит в основном от плотности образца; сопротивление динамической пенетрации в вакууме в рыхлом базаль-товом порошке меньше, а в плотном больше, чем при нормальном атмосферном давлении.

Барнеттом и другими исследователями [37] изуча-лось сопротивление гранулированной породы статиче-ской нагрузке в условиях вакуума. В опытах применя-лись порошки с различной крупностью частиц, пригото-вленные из оливинового базальта. Испытания проводи-лись в вакууме при разрежении 10^{-6} *мм рт. ст.* Было получено, что реакция на статическую нагрузку в усло-виях вакуума зависит в основном от плотности материа-ла. В работе показано, что в условиях лунного гравита-ционного поля образцы с рыхлой упаковкой выдержи-

вают такую же нагрузку на единицу площади, как и на Земле; образцы с плотной упаковкой материала могут выдерживать значительно бóльшую нагрузку.

Роди и другие исследователи [38] изучали динамическую пенетрацию в разрушенные породы при атмосферном давлении и в вакууме. В качестве инденторов использовались литые латунные цилиндры длиной 5 см. Один из концов каждого зонда был заострен на конус с углом при вершине 60° . В опытах было использовано два диапазона плотностей рыхлого материала: от 1,59 до 1,67 г/см³ и от 1,34 до 1,44 г/см³. Большинство опытов было проведено в вакууме при разрежении 10^{-5} мм рт. ст.

Полученные результаты показали, что плотность является наиболее важным параметром, влияющим на проникание индентора в грунт. Кроме того, результаты экспериментов и теоретическое рассмотрение величины срезающих усилий в различных условиях позволили авторам сделать следующие выводы. Было установлено, что индентор, свободно падающий в воздухе, проникает в плотно упакованный материал на меньшую глубину, чем в материал неплотной упаковки; в вакууме — в неплотно упакованный материал на меньшую глубину, чем в плотно упакованный, находящийся в воздухе, и в плотно упакованный материал на большую глубину, чем в плотно упакованный в воздухе.

По мнению Хилла и Какмака [36], результаты опытов Барнетта и Роди ошибочны, так как исследуемые образцы не были полностью дегазированы. Авторы работы [37] признают незначительность величины вакуума, в результате чего влияние атмосферного давления на несущую способность грунтов выявлено не было.

Эксперименты, выполненные в условиях вакуума, противоречивы и не всегда подтверждают, как предполагали многие исследователи, что сопротивление сдвигу и пенетрации являются функцией величины вакуума. Некоторые исследования показали [5, 34, 36], что сопротивление сдвигу, а также статической и динамической пенетраций увеличивается с ростом величины вакуума. Другими работами [35, 37, 38] установлено, что изменение указанных свойств зависит в основном от плотности грунта. К сожалению, в большинстве сообщений отсутствуют показатели пористости, хотя хорошо известно (об этом говорят и результаты рассмотренных

опытов), что эта характеристика является важнейшей при определении сопротивления пенетрации зернистого материала.

Как отмечают в своих обзорных статьях Митчелл и Джонсон [31, 32], выполненные экспериментальные работы не позволяют установить влияние вакуума и ускорения силы тяжести на физико-механические свойства грунтов. Поэтому предполагалось продолжать исследования, сочетая их с изучением механических свойств грунтов непосредственно на поверхности Луны.

В работах по механике лунных грунтов подчеркивается, что в случае их высокой пористости характер деформации этих грунтов под нагрузкой будет отличаться от характера деформации земных плотных грунтов [5, 31]. В связи с этим рассматриваются две характерные модели грунтов: плотно упакованная зернистая система, в которой при больших осадках штампа наблюдается выпирание грунта в стороны, и рыхлый зернистый материал, деформация которого происходит практически без выпирания. В первом случае осадка зависит главным образом от коэффициента трения и плотности зерен, а во втором — от структуры грунта. В работах подчеркивается необходимость продолжать теоретические и экспериментальные исследования механических свойств рыхлых грунтов.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, СОВЕРШИВШИМИ МЯГКУЮ ПОСАДКУ

Создание автоматических лунных станций, способных производить мягкую посадку и доставлять на поверхность Луны научную аппаратуру, открыло новый этап в ее исследовании и положило начало экспериментам, имеющим целью прямое определение структуры, плотности и механических свойств лунных грунтов.

3 февраля 1966 г. совершила мягкую посадку на Луну советская автоматическая лунная станция «Луна-9». 24 декабря 1966 г. на Луну опустилась новая советская станция «Луна-13». 2 июня 1966 г. произвел посадку американский аппарат «Сервейер-1», а 20 апреля 1967 г. — аппарат «Сервейер-3». Таким образом, за короткий срок четыре космических аппарата осуществили

благополучную мягкую посадку, в результате чего были проведены различные эксперименты по исследованию свойств лунных грунтов.

«ЛУНА-9» И «СЕРВЕЙЕР-1»

Успешная посадка станций «Луна-9» и «Сервейер-1» прежде всего показала, что лунный грунт выдерживает динамическую нагрузку при посадке космического аппарата, а затем и длительную статическую нагрузку от него без больших деформаций, которые могли бы представлять опасность. Телевизионные фотоснимки станции «Луна-9» показали, что в месте посадки отсутствует толстый и рыхлый пылеватый покров, в котором мог бы «утонуть» лунный корабль [39].

Эти данные имеют большое принципиальное значение и свидетельствуют о том, что поверхностный слой Луны в месте посадки станции «Луна-9» обладает достаточно высокой несущей способностью и главную опасность при посадке лунных кораблей, по-видимому, будет представлять не рыхлый пылевой слой, а неровности рельефа, камни и лунки. По мнению К. П. Флоренского [30], несущую способность грунта Луны определяет промежуточный слой, лежащий на скальном основании.

К таким же выводам можно прийти, изучая телевизионные снимки, сделанные аппаратом «Сервейер-1». Детали, выявленные аппаратурой автоматической станции «Луна-9», пополнились крупными глыбами, выступающими на поверхность грунта, столкновение с которыми чревато серьезными динамическими перегрузками и потерей устойчивости для прилуняющегося корабля.

Аппарат «Сервейер-1» был оборудован посадочным устройством с тремя опорными подушками, укрепленными на концах трех опор. Подушки диаметром 30,5 см и высотой 12,8 см были изготовлены из металлических сот. Нижний слой сот высотой 6,4 см имел предел прочности на смятие $0,7 \text{ кг/см}^2$, а верхний — $1,4 \text{ кг/см}^2$. Смятие сот должно было смягчить удар при посадке на твердую поверхность [40].

Опоры аппарата имели шарниры и амортизаторы, что позволяло им упруго деформироваться при ударе. На элементах аппарата были укреплены акселерометры и установлены тензометрические датчики, которые позво-

ляли измерять ускорения аппарата при посадке и усилия, возникающие в элементах конструкции. Телевизионная аппаратура могла фотографировать опорные подушки аппарата и оставленные ими на лунной поверхности следы. Аппарат садился на тормозном двигателе с вертикальной скоростью примерно $3,5 \text{ м/сек}$. Во время посадки аппарат «Сервейер-1» совершил после первого удара прыжок высотой 6 см , после чего остановился. На телевизионных снимках видны отпечаток опорной подушки, сделанный при первом ударе, а также опорная подушка, частично погрузившаяся в грунт и слегка сдвинувшаяся в горизонтальном направлении при окончательной посадке.

Кроме того, на снимках видны кромки лунки вдавливания и сотовая структура опорной подушки, оставшаяся неповрежденной. Американские ученые находят, что борт лунки слегка приподнят над окружающей поверхностью, материал под опорой уплотнен, а часть его выброшена на прилегающую территорию. Грунт вообще представляется зернистым, а выброшенный материал состоит из более крупных комков, чем материал нетронутой поверхности. Также высказывается предположение об агрегатном строении этих комков.

При обработке телеметрических данных тензометров и акселерометров было установлено, что сила первого удара опоры составила от 195 до 225 кг . Поскольку нижняя часть опорной подушки имела форму усеченного конуса с нижним диаметром, равным $20,3 \text{ см}$, среднее удельное давление составило от $0,42$ до $0,69 \text{ кг/см}^2$, в среднем около $0,5 \text{ кг/см}^2$, а статическое удельное давление — $0,03 \text{ кг/см}^2$. Глубина погружения одной из опор была равна 2 см .

Приняв плотность поверхностного слоя лунного грунта по аналогии с почвенными слоями Земли равной $1,5 \text{ г/см}^3$, американские ученые, используя методы механики грунтов, рассчитали, что угол внутреннего трения лунного грунта составляет $30\text{--}40^\circ$, а сцепление — $0,0013\text{--}0,004 \text{ кг/см}^2$ при несущей способности лунного грунта $0,35 \text{ кг/см}^2$.

Другая попытка вычисления механических параметров лунного грунта, сделанная в США [41], привела к следующим результатам: плотность $0,6\text{--}0,7 \text{ г/см}^3$ на поверхности и 1 г/см^3 на глубине 10 см ; удельное сцепление от $0,0001$ до $0,1 \text{ кг/см}^2$, угол внутреннего трения 55° ,

несущая способность при нулевой осадке штампа диаметром 25 см $0,4 \text{ кг/см}^2$.

Структура поверхностного слоя зернистая, отдельные зерна могут быть пористыми, крупность частиц в основном составляет менее 0,1 мм. На поверхности зернистого грунта имеется некоторое количество частиц крупнее 1 мм, а также камней и блоков размером до 1 м.

«ЛУНА-13»

Одной из основных задач запуска автоматической станции «Луна-13» (рис. 7) являлась первая прямая инструментальная разведка инженерно-строительных свойств поверхностного слоя грунта Луны. На станции находились приборы, позволяющие оценить механическую прочность грунта и плотность, что является минимально необходимым для определения его несущей способности теоретическими методами механики грунтов и методами моделирования [42, 56].

Разведка свойств лунного грунта проводилась с помощью механического грунтомера-пенетromетра, радиационного плотнометра и динамографа, работавших независимо друг от друга.

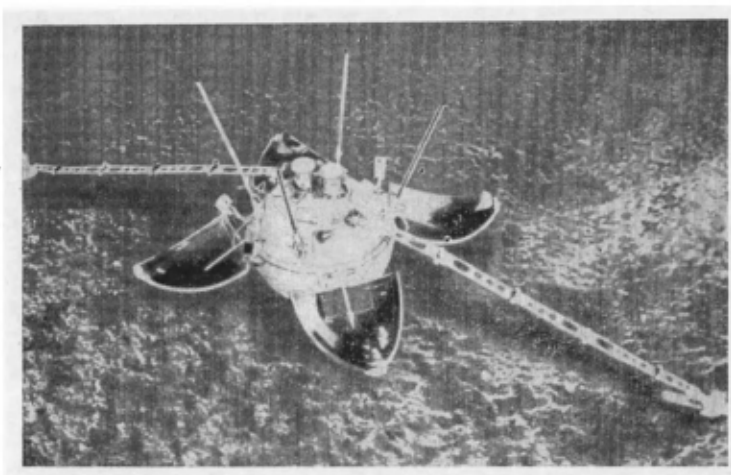


Рис. 7. Автоматическая лунная станция «Луна-13»

В центре размещен корпус станции, слева — выносной механизм с грунтомером-пенетрометром, справа — выносной механизм с датчиком радиационного плотнометра

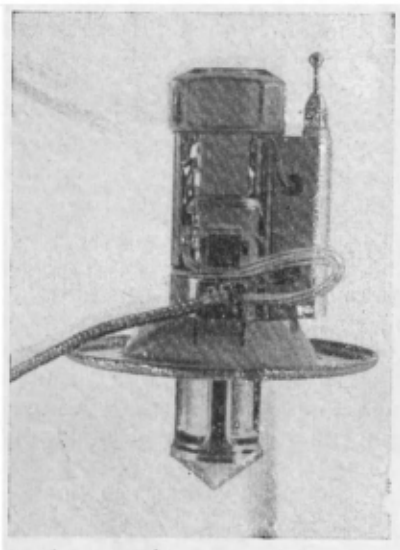


Рис. 8. Общий вид грунтомера-пенетрометра

Грунтомер - пенетрометр (рис. 8) — первый научный прибор, примененный для оценки механической прочности лунного грунта. Он состоит из пластмассового корпуса, нижняя часть которого образует кольцевой штамп с наружным диаметром 12 см и внутренним диаметром 7,15 см. Верхняя цилиндрическая часть корпуса служит направляющей для титанового индентора. Последний имеет коническую нижнюю часть и цилиндрическую верхнюю. Угол заострения конуса, 103° .

Максимальный диаметр его основания 35 мм. Индентор может выдвигаться из корпуса на расстояние до 5 см.

Цилиндрическая часть индентора служит корпусом реактивного двигателя твердого топлива с соплом, обращенным вверх. Непосредственно за срезом сопла двигателя размещено электропиротехническое устройство запуска двигателя, которое после срабатывания отбрасывается давлением пороховых газов. Одновременно отбрасывается крышка корпуса прибора; при этом перерезаются провода электроцепей пускового устройства и освобождается шариковый замок, связывающий индентор с корпусом прибора, и индентор перемещается вниз.

Продолжительность действия двигателя в земных условиях 0,6—1 сек, средняя сила тяги 5—7 кг.

Цилиндрическая часть индентора имеет выступ, перемещающийся в вертикальной прорези корпуса прибора и связанный с движком потенциометра, который измеряет величину смещения индентора относительно корпуса прибора. В рыхлые пылевидные грунты индентор может погрузиться более чем на 5 см. При этом он захватывает своим выступом корпус прибора и вдавли-

вает в грунт его кольцевой штамп. Погружение штампа может быть приближенно оценено по фототелевизионным снимкам.

Оценка механических свойств грунтомером-пенетрометром производится после того, как прибор вынесен на поверхность грунта с помощью особого пятизвенного выносного механизма. Команда на запуск двигателя прибора подается после того, как раскрываются лепестковые антенны станции, срабатывает выносной механизм и с потенциометра снимается нулевой отсчет.

После прекращения работы двигателя индентор остается в положении, достигнутом к этому моменту. Очередной опрос потенциометра телеметрической системой станции позволяет установить глубину погружения индентора, а последующие опросы — уточнить эту цифру и проследить за перемещениями индентора от различных внешних воздействий. Точность измерений составляет $\pm 0,03$ см.

Размеры конуса пенетрометра и рабочее усилие двигателя были выбраны с таким расчетом, чтобы конус мог погрузиться на измеримую глубину в большинство сильно связных зернистых и пористых твердых пород, которые могут встретиться на поверхности Луны, за исключением очень прочных лав. Погружение цилиндрической части индентора возможно при наличии несвязных или слабо связных зернистых грунтов. Кольцевой штамп может быть вдавлен только в самые слабые несвязные зернистые грунты и рыхлые пылевидные материалы.

Для наземной тарировки прибора было использовано четырнадцать видов различных материалов, в том числе: пористая базальтовая (рис. 9) и андезито-базальтовая лавы, пенобетон и пеностекло, кварцевый песок, гранитная дресва, керамзитовый гравий и аглопоритовая дресва (рис. 10), вспученный перлитовый песок и другие материалы с объемным весом от 1,95 до 0,16 г/см³ при их агрегатном состоянии от плотного твердого до рыхлого пылевидного. Тарировочные испытания производились на больших блоках твердых материалов, а также зернистых и пылевидных, засыпанных в цилиндрические баки глубиной и диаметром 60 см. Вдавливался индентор силой тяги двигателя прибора и в ряде опытов статической нагрузкой.

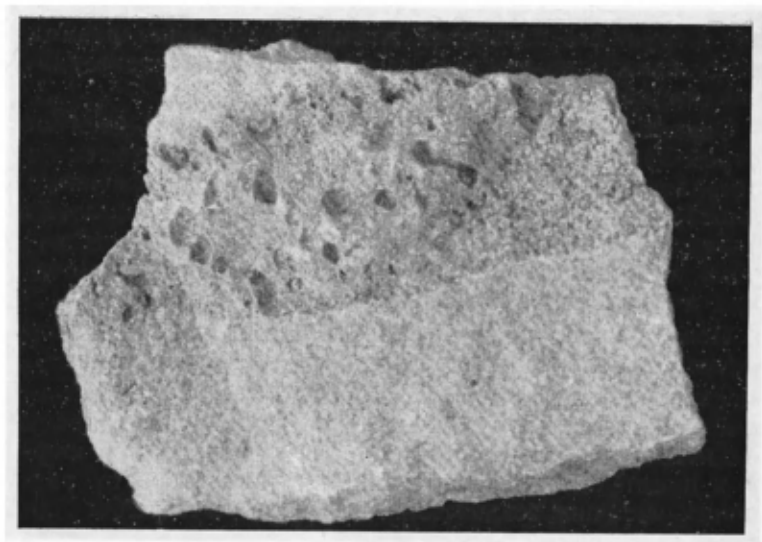


Рис. 9. Образец пористой базальтовой лавы

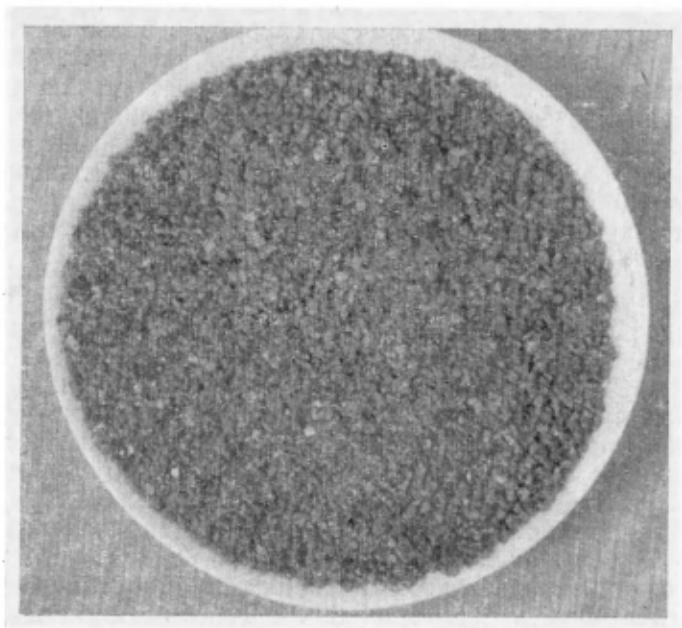


Рис. 10. Образец зернистого несвязного аглопорита

В результате тарировки была установлена глубина погружения индентора и корпуса прибора в каждый из исследованных материалов (табл. 6), что впоследствии было использовано для расшифровки данных, полученных с Луны. В дополнение к опытам в обычных земных условиях проведена серия опытов в вакуум-камере с разрежением воздуха 25—37 мм рт. ст., показавшая, что сила тяги двигателя увеличивается при этом в среднем на 8,5%, а также опыты, устанавливающие влияние ускорения силы тяжести на глубину вдавливания индентора в зернистые грунты.

Последние проводились в кабине самолета, двигающегося по траектории, на которой выдерживалось ускорение, равное лунному ускорению силы тяжести, т. е. $1,64 \text{ м/сек}^2$. Индентор вдавливался в зернистые грунты двух видов с помощью спиральной пружины; глубина вдавливания регистрировалась механическим самописцем. Установлено, что понижение ускорения силы тяжести в шесть раз по сравнению с земным приводит к увеличению глубины погружения индентора прибора в среднем на 70%.

Таблица 6

**Результаты тарировочных испытаний
грунтомера-пенетromетра в земных условиях**

Глубина погружения в см		Объемный вес моделиру- ющего мате- риала в г/см ³	Природные и искусственные моделирующие материалы
индентора	корпуса		
0	0	2,4 и более	Твердые и плотные скальные породы и тяжелый бетон
0—1,3	0	0,25—2	Пенистые и пористые скальные породы, связные грунты пенобетон, пено-стекло, керамзит на органической связке
1,3—5	0	1,3—1,7	Несвязный зернистый грунт средней плотности, кварцевый песок
1,3—5	0—1	0,25—0,77	Несвязный зернистый грунт малой плотности, дробленый пенобетон, керам-зит, аглопорит
5	>1	0,16 и менее	Особо рыхлый, пылевидный грунт, вспученный перлитовый песок

Грунтомер-пенетрометр был впервые применен для исследования грунтов лунной поверхности 24 декабря 1966 г. в 21 ч 6 мин по московскому времени после осуществления мягкой посадки автоматической лунной станции «Луна-13». Первоначальная глубина погружения составила 4,5 см, а в дальнейшем она колебалась от 4,17 до 4,33 мм, по-видимому, вследствие температурных деформаций выносного механизма и корпуса станции.

При выдвижении индентора на 4,5 см, т. е. менее чем

на 5 см, его выступ не мог увлечь за собой корпус прибора и, следовательно, кольцевой штамп в грунт под действием силы тяги индентора не погружался.

С учетом повышения силы тяги в вакууме и увеличения погружения при лунном ускорении силы тяжести глубина внедрения индентора в тот же грунт в земных условиях должна была составить около 2,6 см. В соответствии с тарифовочными испытаниями это могло произойти в двух случаях: при работе прибора на сыпучем кварцевом песке с объемным весом более $1,52 \text{ г/см}^3$ или на легком пористом зернистом материале типа керамзита, а также аглопоритовой дресвы с объемным весом $0,77 \text{ г/см}^3$, обладающем слабым сцеплением между зернами. Поскольку присутствие на поверхности Луны в самом верхнем слое материалов с объемным весом более $1,5 \text{ г/см}^3$ считается маловероятным, следует, по-видимому, признать более достоверным существование слоя слабосвязного легкого зернистого материала толщиной под грунтомером-пенетрометром не менее 5 см.

Приведенные данные относятся к случаю работы прибора на ровной поверхности. Поскольку лунные панорамы, снятые станциями «Луна-9», «Луна-13» и «Сервейер-1», показали, что поверхность Луны изобилует многочисленными средними и мелкими неровностями в виде камней и луннок, которые могут исказить показания прибора, рассчитанного на ровную поверхность, был сделан анализ вероятности получения полезной информации от грунтомера-пенетрометра. С этой целью были обработаны сведения о микрорельефе лунной поверхности, опубликованные в работе [39].

Вследствие попадания корпуса прибора на камень или в лунку создается зазор между поверхностью грунта и прибором, что в большинстве случаев приводит к занижению показателей механической прочности грунта. Принимая в качестве максимально допустимого зазор, равный 12 мм, при котором по показаниям грунтомера-пенетрометра еще возможно различить твердый, зернистый и пылевидный грунты, было установлено, что так называемая суммарная дефектная площадь¹ составляет около 30% окружающей станцию «Луна-9» поверхности.

¹ Под суммарной дефектной площадью понимают сумму площадей, занятых камнями и лунками, и окружающих их кольцевых площадок шириной, равной полуширине корпуса прибора, плюс сумма отдельных площадок вокруг точек резких переломов — уклонов поверхности между камнями и лунками.

Вокруг станции «Луна-13» поверхность была более ровной.

Принимая во внимание приближенность описанных расчетов, было признано целесообразным считать, что вероятность получения полезных результатов составляет примерно 70%.

Первое непосредственное измерение плотности поверхностного слоя Луны было произведено с помощью автоматической станции «Луна-13» методом измерения интенсивности рассеянного гамма-излучения. Приборы, основанные на использовании этого метода, включают детектор и источник гамма-квантов, разделенные свинцовым экраном, поглощающим прямое гамма-излучение. Поэтому детектор регистрирует только гамма-кванты, рассеянные в окружающей прибор среде. Этот метод применяют для измерения плотности тонких (5—10 см) поверхностных слоев путем наложения прибора на открытую поверхность. Последнее обстоятельство определило выбор данного варианта прибора для определения плотности поверхностного слоя Луны.

Физическая сущность метода рассеянного гамма-излучения заключается в использовании закономерностей взаимодействия гамма-квантов с веществом. Обладая электромагнитной природой, гамма-кванты проникают в вещество и взаимодействуют с атомными ядрами, электронами и электрическим полем. В результате гамма-кванты рассеиваются или поглощаются. Для источников с энергией фотонов менее 2 Мэв, обычно применяемых в приборах, основными процессами взаимодействия являются фотоэффект, приводящий к поглощению гамма-квантов, и комптоновское рассеяние гамма-квантов на электронах среды (комpton-эффект).

При измерении плотности методом рассеянного гамма-излучения пользуются функциональной зависимостью между регистрируемой интенсивностью гамма-излучения и плотностью среды $N=f(\rho)$, график которой можно разделить на три части: восходящую ветвь, область максимума и нисходящую ветвь. При этом положение максимума зависит от «базы» прибора L — расстояния между серединой счетчика и источником, от энергии источника, а также от конструкции самого радиометрического прибора.

Такой характер зависимости обусловлен процессами — рассеяния и поглощения гамма-излучения. Вероятность комптоновского рассеяния пропорциональна числу электронов в единице объема. Поэтому с увеличением плотности среды интенсивность рассеянного излучения должна возрастать, что и наблюдается при небольших значениях плотности. Однако в результате многократного рассеяния происходит уменьшение энергии гамма-квантов и, следовательно, увеличивается вероятность их поглощения за счет фотоэффекта. Постепенно поглощение начинает преобладать, и тогда при увеличении плотности среды интенсивность рассеянного излучения, регистрируемого счетчиком, уменьшается (рис. 11).

Таким образом, каждому значению измеренной интенсивности рассеянного излучения соответствуют два значения плотности исследуемой среды по восходящей и нисходящей ветвям кривой, выбор между которыми приходится производить, используя дополнительные данные.

На рис. 11 показано интегральное изменение скорости счета, которое является результатом регистрации определенного непрерывного спектра гамма-квантов. Процесс формирования спектра многократно рассеянных гамма-квантов зависит от особенностей прохождения гамма-лучей через среду. В общем случае (при расположении источника и детектора в бесконечной среде) детектор, находящийся на некотором расстоянии d от источника излучений, регистрирует гамма-кванты, не проваимодействовавшие со средой и претерпевшие комптоновское рассеяние. При регистрации детектором только нерассеянных гамма-квантов ослабление пучка квантов N_0 подчиняется экспоненциальному закону:

$$N = N_0 e^{-\mu \rho d},$$

где μ — массовый коэффициент поглощения квантов с определенной энергией в данной среде;

N_0 — регистрируемая интенсивность при отсутствии поглощающего слоя.

Гамма-лучи, попавшие в детектор после одного или нескольких рассеяний, имеют меньшую энергию, чем энергия первичного излучения, что приводит к образованию непрерывного энергетического спектра. Регистрируемый спектр зависит в той или иной степени от расположения источника по отношению к детектору, спектрального

состава первичного гамма-излучения, экранировки детектора, химического состава среды и геометрии измерений.

Первичные гамма-кванты, рассеиваясь на электронах среды, теряют свою энергию тем больше, чем на большие углы происходит их рассеяние и чем больше актов рассеяния наблюдалось. Вероятность взаимодействия гамма-излучения со средой увеличивается по мере удаления гамма-кванта от источника. На основании этого с удалением от источника уменьшается количество первичных квантов и возрастает число рассеянных гамма-квантов. Таким образом, относительное число квантов малой энергии постепенно возрастает (рис. 12). По мере накопления гамма-квантов малой энергии увеличивается вероятность фотопоглощения, которое снижает число рассеянных квантов. Накопление рассеянных гамма-квантов низких энергий и их

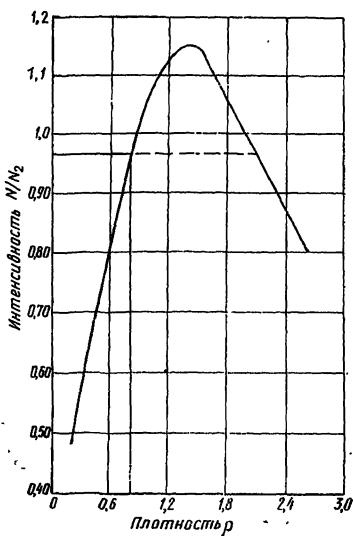


Рис. 11. Тарировочная кривая радиационного плотномера

поглощение обуславливают появление максимума в низкоэнергетической части спектра регистрируемого рассеянного гамма-излучения. Из рис. 12 видно, что с увеличением плотности среды происходит «смягчение» энергетического спектра. Различие спектров наиболее резко проявляется при малых значениях плотностей среды.

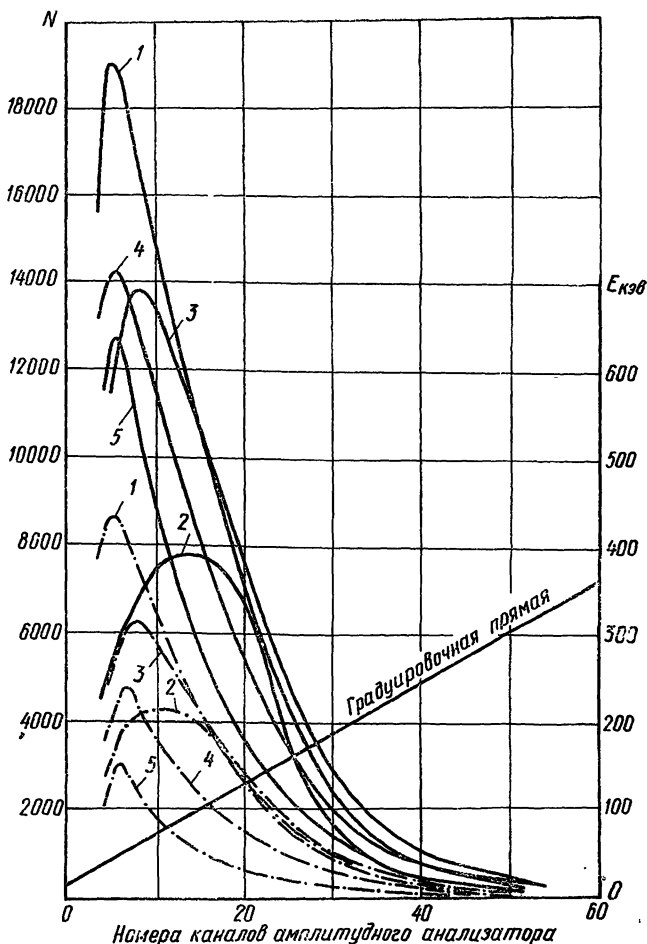


Рис. 12. Энергетические спектры материалов разной плотности

Сплошная и пунктирная линии, обозначенные одним индексом, соответствуют различным «базам» датчика; 1—0,16 г/см³; 2—0,82 г/см³; 3—1 г/см³; 4—1,42 г/см³; 5—1,8 г/см³

Величина B , именуемая фактором накопления, характеризует накопление рассеянного излучения $N_{\text{рас}}$ по отношению к нерассеянному $N_{\text{нерас}}$:

$$B = \frac{N}{N_{\text{нерас}}},$$

где $N = N_{\text{нерас}} + N_{\text{рас}}$ — общая регистрируемая интенсивность излучения.

При регистрации детектором рассеянного и нерассеянного гамма-излучения (источник и детектор в бесконечной среде) ослабления пучка гамма-квантов представляют в следующем виде:

$$N = N_0 e^{-\mu_{\text{рд}}} B.$$

В случае регистрации только рассеянных гамма-квантов скорость счета определяется фактором накопления. Определение плотности гамма-методом не зависит от свойств среды только в том случае, если изменение их не приводит к изменению регистрируемого энергетического спектра. Максимальное количество примесей других элементов к силикатной среде, присутствие которых не влияет на результаты измерений, приведено в табл. 7.

Таблица 7

Группы химических элементов и их количество, не влияющее на результаты измерений плотности гамма-методом

Группа химических элементов	Al, Na, Cl	Fe, Cu, Ni, Zn, Ca	H ₂ O
Количество в %	< 12	< 10	< 6

Радиационный плотномер станции «Луна-13» состоял из блока датчиков ДРП (рис. 13) и электронного блока ЭБРП. Блок датчиков размещался на выносном механизме, аналогичном выносному механизму грунтомера-пенетрометра. Регистрирующий блок размещался в

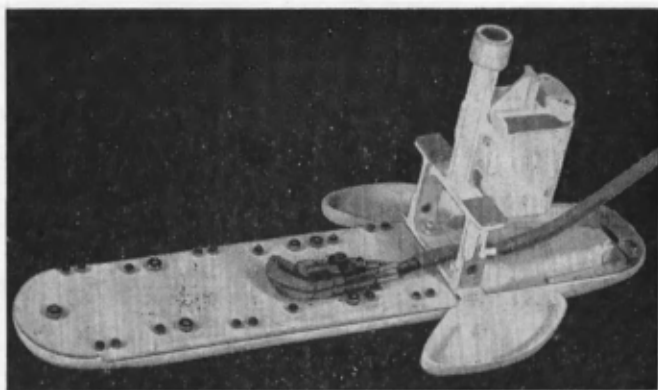


Рис. 13. Блок датчиков радиационного плотмера

герметичном корпусе станции и соединялся с блоком датчиков тремя кабелями.

В блоке датчиков имелся источник гамма-излучения — радиоактивный изотоп цезия Cs-137 активностью 1 мг·экв радия, разделительный свинцовый экран и три группы малогабаритных гамма-счетчиков СБМ-10м по пять штук в каждой группе. Расстояние середины каждой группы от источника излучения было разным, и прибор работал при трех различных длинах «базы». Корпус блока датчиков размером $258 \times 48 \times 10$ мм был снабжен двумя боковыми сегментами для облегчения ориентации на поверхности грунта.

Питание на счетчики напряжением 380 в подавалось от блока ЭБРП через сопротивления 51 и 5,1 Мом, находящиеся в блоке датчиков. Датчик радиационного плотномера соединялся с блоком ЭБРП экранированным кабелем длиной около 2,5 м. Таким образом, величина сигнала, снимаемого со счетчиков, определялась отношением величин емкости, шунтирующей нагрузку счетчика, и емкости относительно корпуса соединительного кабеля. Величина этого сигнала на входе счетных ячеек равнялась нескольким вольтам. Уменьшение его величины по сравнению с величиной полного сигнала на счетчике (~ 50 в) необходимо для того, чтобы исключить наводку импульсов в блоке ЭБРП. Сигналы, поступающие от датчика радиационного плотномера, имели отрицательную полярность.

Конструктивно ЭБРП представлял собой полукольцо высотой 42 мм с внешним и внутренним радиусом соответственно 175 и 113 мм (рис. 14) и включал преобразователь напряжения и 27 электронных плат регистрирующего и обрабатывающего устройства.

Блок регистрации состоял из трех идентичных каналов, а каждый канал — из соединенных последовательно усилителя-ограничителя, пяти триггеров предварительного пересчета и трех сумматоров, каждый из которых представлял три последовательных триггера и сумматор.

Выходным сигналом сумматора являлась величина напряжения от 0 до 6 в, изменяющаяся скачкообразно в соответствии с опрокидыванием триггеров.

Общее число зарегистрированных импульсов в канале определялось путем поочередного измерения напряжений на выходе сумматоров.

Ступенчатое изменение напряжения с выходов каждого канала электронного регистрирующего блока записывалось на пленку телеметрии и обрабатывалось с помощью специальных таблиц.

Таблицы и кривая для окончательной расшифровки показаний прибора были составлены на основании наземной тарировки его на средах различной плотности — тяжелом и легком бетоне, керамзите, пеностекле и др. Тарировка велась в диапазоне изменения плотности указанных материалов от 0,16 до 2,6 г/см³. В процессе тари-

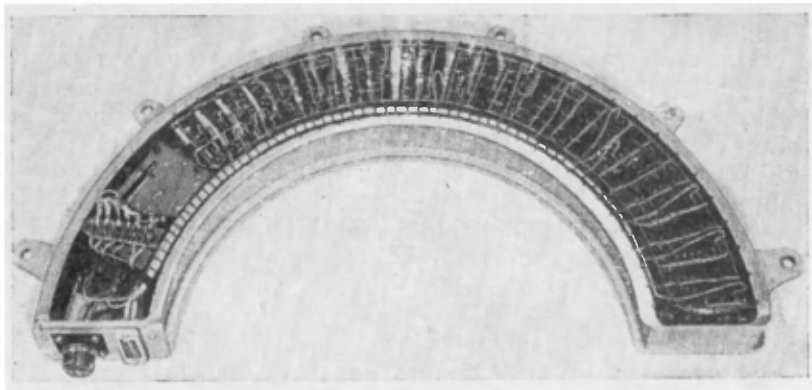


Рис. 14. Электронный блок радиационного плотномера

ровки исследовался состав энергетического спектра, регистрируемого рассеянного гамма-излучения.

Особое внимание уделялось изучению влияния на показания прибора неровностей поверхности исследуемого материала. Зазоры между подошвой блока датчиков и поверхностью грунта различно влияют на регистрируемую интенсивность гамма-излучения в зависимости от плотности среды. Так, для плотных сред, расположенных на нисходящей ветви зависимости $N=f(\rho)$, при наличии каверн или неплотном прилегании датчика характерно увеличение регистрируемой интегральной скорости счета. При проведении измерений на средах очень малой плотности (до 0,4 г/см³) неплотное прилегание вызывает уменьшение скорости счета для всех баз радиационного плотномера, а другие среды вблизи подошвы прибора имеют точки инверсии, которые помогают исключить влияние контактных условий измерений.

Результаты экспериментов по изучению влияния каверн объемом примерно 12 см^3 , проведенные с применением радиационного плотномера на средах с плотностью $0,75 \text{ г/см}^3$, показали, что каверны диаметром 3—4 см и глубиной 2—2,5 см незначительно влияют при данной плотности на изменение скорости счета. Погрешности составляют 5—10% в зависимости от расположения каверны под плоскостью датчика. При этом для малой базы происходит занижение регистрируемой интенсивности, а для максимальной — завышение. Если датчик расположен «на буграх» высотой 2—2,5 см, завышение скорости счета происходит при максимальной «базе» на 15—20%. Для минимальной «базы» прибора при тех же условиях измерений скорость счета уменьшается на такую же примерно величину.

Поскольку в прибор входили три группы счетчиков с различными базами, влияние неровностей на осредненный результат измерений значительно ослаблялось, поэтому расшифровывались результаты измерений по суммарному тарифовочному графику.

Интенсивность рассеянного излучения, зарегистрированная во время первого сеанса связи со станцией «Луна-13», составила 0,96 условных единиц. Каждая условная единица равна приведенной средней сумме импульсов, зарегистрированных прибором при работе на материале с плотностью 2 г/см^3 . На графике (см. рис. 11) этому соответствуют два значения плотности ρ : 0,8 и $2,1 \text{ г/см}^3$. Первая цифра характерна для легких пенистых и пористых материалов типа шлака, пемзы, пеностекла и зернистых материалов, состоящих из легких гранул; вторая — для плотных материалов типа тяжелого бетона или скалы. Поскольку, согласно данным большинства астрономических, фотографических и радиофизических исследований, маловероятно присутствие плотных каменных пород в самом верхнем слое, плотность лунных пород $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$ была признана более достоверной. Эта величина относится к слою толщиной около 15 см, на который распространяется зона действия радиационного плотномера.

На панораме лунной поверхности (рис. 15), снятой 25 декабря 1966 г. после мягкой посадки автоматической станции «Луна-13», видны датчик радиационного плотномера и выносной механизм прибора.

Динамограф представлял собой систему акселеро-

метров, установленную на корпусе станции и регистрирующую перегрузки, которые возникают при соударении станции с поверхностью Луны. Этот прибор также был протарирован в земных условиях на песке разной плотности и поролоне, причем удалось получить серию характерных осциллограмм для каждого из испытанных

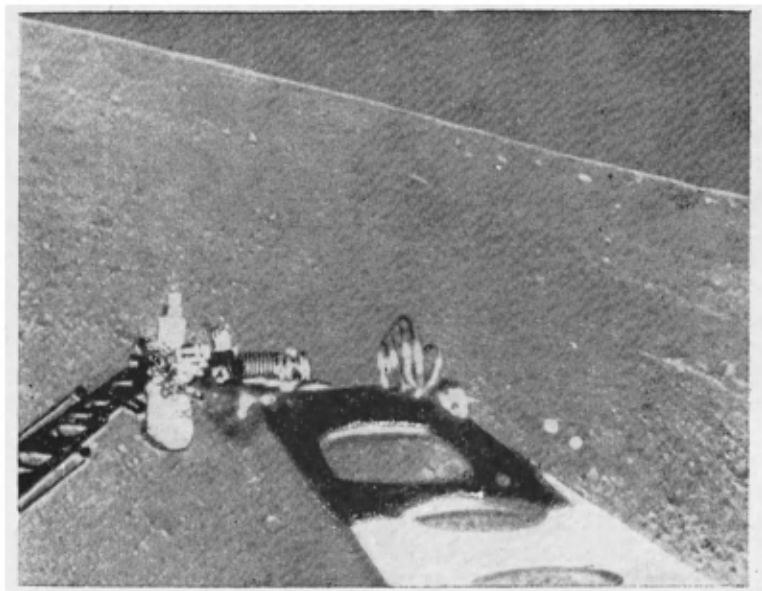


Рис. 15. Фрагмент лунной панорамы, снятой автоматической станцией «Луна-13» 25 декабря 1966 г.

На переднем плане размещены детали выносного механизма; в середине — датчик радиационного плотнoмера

материалов. Сравнение данных, полученных путем обработки этих осциллограмм, и информации, переданной телеметрической системой «Луны-13», позволило установить, что разрыхленный песок является материалом, наиболее соответствующим представлению о лунном грунте.

Суммируя сведения, полученные от всех трех приборов, можно заключить, что в месте посадки станции «Луна-13» лежит слой зернистого, рыхлого, слабосвязного материала с объемным весом около $0,8 \text{ г/см}^3$, который состоит из зерен и пористых гранул минерального

вещества. Толщина этого слоя в месте измерения под грунтомером-пенетрометром составляет не менее 5 см. На поверхности грунта рассеяны камни различной крупности, видные на панораме.

Основываясь на закономерностях механики грунтов [56] и рассматривая коническую часть индентора грунтомера-пенетрометра как эквивалент уплотненного конуса грунта под жестким круглым штампом, можно оценить сцепление между зернами поверхностного слоя лунного грунта исходя из установленного прямым измерением объемного веса ($0,8 \text{ г/см}^3$ в земных единицах, т. е. $0,133 \text{ г/см}^3$ на Луне) и угла внутреннего трения 32° (аглопорит). При этом сцепление примерно равно $0,005 \text{ кг/см}^2$, несущая способность $0,68 \text{ кг/см}^2$ при глубине вдавливания 2,9 см, а коэффициент постели составляет $0,18 \text{ кг/см}^3$ при удельном давлении $0,68 \text{ кг/см}^2$.

Коэффициент постели позволяет определить в первом приближении глубину погружения опорных подушек лунного корабля или глубину следов обуви космонавтов по среднему удельному давлению на грунт. Например, для опоры аппарата «Сервейер-1» глубина вдавливания будет равна $s=0,5:0,18=2,6 \text{ см}$. Глубина следа космонавта составит около 1 см.

«СЕРВЕЙЕР-3»

На аппарате «Сервейер-3» (рис. 16) был установлен механический манипулятор, т. е. мног шарнирный механизм, приводящийся в действие электродвигателями [43]. Его рабочий орган — маленький экскаваторный ковш применялся в качестве штампа для испытания грунта статической и динамической нагрузками; при этом его опорная площадка имела размер $2,5 \times 5 \text{ см}$. Усилие на штамп можно было измерить, а изображение ковша и деформированной им поверхности сфотографировать и передать на Землю. Манипулятором производилась разработка траншей, которые попадали в поле зрения телевизионных камер. Аппаратом «Сервейер-3» сделано много снимков окружающей поверхности, которые оказались сходными с полученными ранее. Наибольший интерес представляют результаты экспериментов с применением манипулятора (рис. 17), вырывшего своим ковшом четыре траншейки максимальной глубиной 15—17,5 см с вертикальными откосами. При разра-

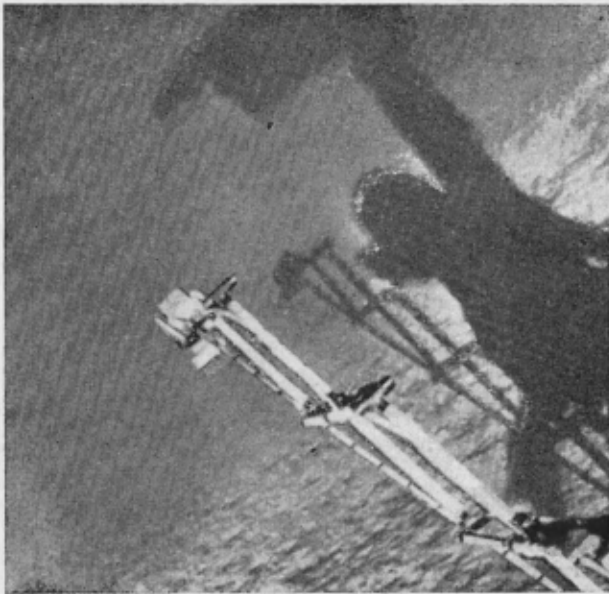


Рис. 17. Манипулятор аппарата «Сервейер-3» (теле-
снимок с Луны)

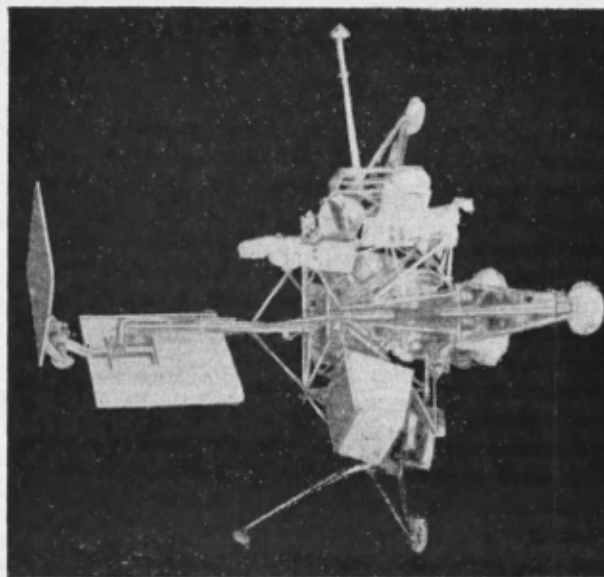


Рис. 16. Автоматическая станция «Сервейер-3»

ботке траншеек было установлено возрастание сопротивления грунта на глубине 6—7,5 см, что может являться следствием увеличения его плотности и связности. Это подтверждается также результатами статических испытаний грунта на разной глубине и динамических испытаний ударами падающего ковша.

В процессе статических испытаний к опорной поверхности ковша площадью 12,5 см² прикладывалась нагрузка от 2,3 до 5 кг, т. е. удельное давление в опытах составляло от 0,18 до 0,4 кг/см². Глубина погружения ковша доходила от 0,63 до 2,9 см. При ударах ковша о поверхность усилие не измерялось. Высота падения ковша изменялась от 15 до 61 см, а глубина погружения — от 1,3 до 5,1 см.

Результаты испытаний грунта с помощью манипулятора, а также анализ данных по динамике соударения опор аппарата с грунтом при посадке, когда аппарат сделал три прыжка, показали следующее. Несущая способность грунта при ширине опорной площадки от 2

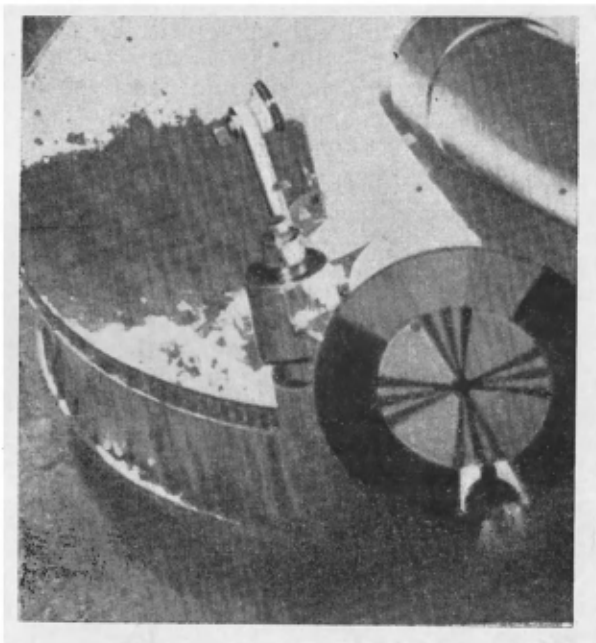


Рис. 18. Грунт, рассыпанный на опорной подушке аппарата «Сервейер-3»

до 20 см составляет $0,2—0,55 \text{ кг/см}^2$, сцепление — $0,001—0,01 \text{ кг/см}^2$, угол внутреннего трения — в среднем 35° . Плотность грунта принята по аналогии с земными почвами равной $1,5 \text{ г/см}^3$.

Помимо этих исследований с помощью аппарата «Сервейер-3» были проведены интересные наблюдения за общими механическими свойствами лунного грунта и содержащимися в нем комками. Часть из них была извлечена на поверхность и выброшена на верхнюю плиту опорной подушки аппарата (рис. 18). При выбросе вместе с комками высыпался также и зернистый материал. Другая часть комков имеет, по-видимому, агрегатное строение и разрушается при действии внешней нагрузки.

«СЕРВЕЙЕР-5», «СЕРВЕЙЕР-6» И «СЕРВЕЙЕР-7»

Вслед за аппаратом «Сервейер-3» были осуществлены запуски космических аппаратов «Сервейер-5», «Сервейер-6» и «Сервейер-7». Последние расширили объем исследований лунных грунтов, так как посадка аппаратов производилась в удаленных друг от друга точках и проводились дополнительные эксперименты. Во всех исследованных пунктах грунты оказались похожими друг на друга. В итоговом отчете по программе «Сервейер» [51] приведена следующая сводная их характеристика.

Грунты — преимущественно мелкозернистые, гранулированные, слабосвязные. По крайней мере в верхней части они обладают сжимаемостью. Статическая несущая способность растет с глубиной и характеризуется следующими цифрами: для верхнего слоя в несколько миллиметров — от $0,01$ до $0,02 \text{ кг/см}^2$, на глубине $1—2 \text{ см}$ от поверхности — $0,18 \text{ кг/см}^2$, на глубине 4 см — от $0,42$ до $0,56 \text{ кг/см}^2$, на глубине 6 см — от $0,4$ до $0,6 \text{ кг/см}^2$. Динамическая несущая способность при глубине вдавливания 3 см превышает $0,24 \text{ кг/см}^2$. По наблюдениям за воздействием на грунт газовых струй верньерных двигателей грунты обладают сцеплением от $0,0007$ до $0,012 \text{ кг/см}^2$, а крупность большинства зерен лежит в диапазоне от $0,06$ до 2 мм .

Газовые струи поднимают пыль, которая затем оседает на деталях конструкции аппаратов.

Были определены также другие показатели физико-механических свойств лунных грунтов по данным экспериментов аппаратов соответственно «Сервейер-5», «Сервейер-6» и «Сервейер-7».

Угол внутреннего трения в град.	37	37	37—39
Сцепление в кг/см ²	—	0,005—0,012	0,0035—0,0070
Объемный вес в г/см ³	1,1	0,7—1,2* и 1,6**	1,2—1,5

* Для верхнего слоя поверхности в несколько миллиметров.
 ** То же, в несколько сантиметров.

Следует отметить, что аппараты «Сервейер-5» и «Сервейер-6» прилунились в морских районах — Море Спокойствия и Залив Срединный, а аппарат «Сервейер-7» совершил посадку в материковом районе Луны у Кратера Тихо. Расстояния между точками посадки измерялись сотнями километров. Однако резких различий в свойствах грунтов не наблюдалось, хотя в каждой из точек прилуновения грунт обладал некоторыми местными особенностями.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЛУННЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Первые определения химического состава горных пород, из которых сложена поверхность Луны, были выполнены в апреле 1966 г. с помощью советской автоматической станции «Луна-10». На ней был установлен многоканальный сцинтилляционный гамма-спектрометр, который измерял интенсивность и спектральный состав гамма-излучения лунной поверхности [44]. Станция «Луна-10» представляла собой искусственный спутник Луны и производила измерения во время облета ее по заданной орбите.

Гамма-излучение лунной поверхности связано с присутствием в лунных горных породах естественных радиоактивных элементов: тория, урана, продуктов их распада и изотопа калия-40. Кроме того, на Луне возникает гамма-излучение в результате взаимодействия космических лучей с лунными горными породами, которое также характеризует химический состав лунного вещества.

За время работы станции «Луна-10» было проведено более 40 сеансов измерений гамма-радиоактивности и были сделаны анализы полученных спектров. Расшифровка полученных данных показала, что лунные спектры не похожи на спектры земных пород, которые определяются только распадом естественных радиоактивных эле-

ментов. Не менее 90% всего гамма-излучения лунных пород обусловлено взаимодействием их с космическими лучами, но общий уровень гамма-излучения приближается к земному.

Специальные эксперименты и расчеты, проделанные для типичных земных пород, позволили построить гамма-спектры, которые должны были зарегистрировать приборы станции «Луна-10» на своей орбите, при условии, что содержание естественных радиоактивных элементов в лунных породах то же, что и в земных гранитах, базальтах, дунитах и в каменных метеоритах — хондритах.

В результате сравнения этих спектров со спектрами лунного вещества было установлено, что количество радиоактивных элементов в последнем соответствует содержанию их в земных породах основного — базальтового — или ультраосновного — дунитового — состава. Пород с большим количеством радиоактивных элементов, к которым относится земной гранит, в районах исследованной поверхности обнаружено не было.

Средняя интенсивность гамма-излучения над лунными морями соответствует той, которая наблюдалась бы над базальтовыми породами. Над лунными материками гамма-излучение естественных радиоактивных элементов практически отсутствует, что должно наблюдаться над ультраосновными породами. Советские ученые [45] делают отсюда вывод о том, что в ранней стадии своего формирования вещество поверхностного слоя Луны по своему составу и структуре было схоже с веществом каменных метеоритов. Впоследствии произошел разогрев недр Луны за счет радиогенного тепла, что вызвало проплавление поверхностного слоя и затопление некоторых участков поверхности Луны расплавленной магмой. Это и привело к образованию лунных морей, состоящих из базальтовых пород. Лунные материки состоят из первичного вещества хондритового состава.

Дальнейшие исследования химического состава лунных грунтов путем анализа их альфа- и протонного излучения, возбужденных специальным источником, были проведены с помощью аппаратов «Сервейер-5», «Сервейер-6» и «Сервейер-7».

На указанных аппаратах были установлены альфа-радиометры. В этих приборах заключался источник радиоактивного излучения кюрий-242, который облучал

лунный грунт альфа-частицами. В результате облучения на счетчики прибора попадали альфа-частицы, рассеянные грунтом, и протоны, излучаемые грунтом под действием альфа-частиц, идущих от источника. По результатам измерений составлялся спектр рассеянного альфа-излучения и протонного излучения, на основании которого определялся химический состав грунта.

В итоговом отчете по программе «Сервейер» [51] были приведены следующие данные (табл. 8).

Таблица 8

Химический состав поверхностных грунтов Луны по результатам определений аппаратами «Сервейер»

Химические элементы	Содержание атомов в %			
	„Сервейер-5“		„Сервейер-6“	„Сервейер-7“
	проба 1	проба 2		проба 1
Углерод	<3	<3	<2	<2
Кислород	58 ± 5	56 ± 5	57 ± 5	58 ± 5
Натрий	<2	<2	<2	<3
Магний	3 ± 3	3 ± 3	3 ± 3	4 ± 3
Алюминий	$6,5 \pm 2$	$6,5 \pm 2$	$6,5 \pm 2$	9 ± 3
Кремний	$18,5 \pm 3$	19 ± 3	22 ± 4	18 ± 4
Группа кальция*	—	—	6 ± 2	6 ± 2
	$13 \pm 3^{***}$	$13 \pm 3^{***}$	—	—
Группа железа**	—	—	5 ± 2	2 ± 1

* К группе кальция относятся элементы с атомным весом около 30—47 (например, фосфор, сера, калий и кальций).

** К группе железа относятся элементы с атомным весом около 47—65 (например, хром, железо и никель).

*** На данной стадии анализа группы кальция и железа не были разделены. Нижний предел содержания железа можно принять равным 3% для каждого из образцов.

На основании исследований американские ученые пришли к выводу, что по химическому составу лунные грунты не совпадают в точности ни с одной из земных пород.

Отличие от ультраосновных пород типа дунита или хондритовых метеоритов состоит в слишком малом содержании алюминия, кальция и кремния в лунных грунтах. С другой стороны, лунные грунты отличаются от гранитов недостатком SiO_2 и избытком элементов группы кальция. Лунные грунты больше всего приближаются к земным базальтам и довольно редкой разновидности метеоритов — базальтовым ахондритам.

Из приведенных данных следует, что в областях лунных морей поверхность сложена базальтовыми породами магматического происхождения. Длительное воздействие на них метеоритной бомбардировки, космической радиации и солнечного излучения привело к созданию раздробленного, дисперсного слоя на поверхности, имеющего зернистое строение.

При излиянии магмы на поверхность Луны, т. е. в область глубокого вакуума, вполне вероятно выделение большого количества растворенных в ней паров и газов и образование вспученных и вспененных пород — пористых базальтовых лав и шлаков основного состава. Лабораторные эксперименты, при которых были получены материалы «бамоливак» и «симоливак» [48], подтверждают это. Дробление таких пористых пород ударами метеоритов могло привести к тому, что по крайней мере частично зерна поверхностного слоя должны иметь пористое строение и низкий объемный вес, несмотря на то что удельный вес плотного базальта равен 3 г/см^3 .

7. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРУКТУРЕ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛУНЫ

Несмотря на значительный объем и многосторонний характер выполненных исследований, не следует забывать о том, что до сих пор грунты Луны были изучены всего лишь в девяти точках, а каждая точка приходится на $4\,200\,000 \text{ км}^2$ ее поверхности. Поэтому данные, приведенные в настоящей брошюре, характеризуют лишь первые шаги на пути изучения лунных грунтов и в значительной мере могут быть изменены и дополнены.

Важнейшим этапом явились эксперименты автоматических лунных станций «Луна» и «Сервейер». В результате работы этих станций было установлено, что поверхностный слой состоит из мелкозернистого слабосвязного материала серовато-коричневого цвета, объемный вес которого в пределах верхних $15\text{—}20 \text{ см}$ может быть равен $0,8\text{—}1,5 \text{ г/см}^3$. Непосредственно на дневной поверхности лежит еще более рыхлый тонкий слой пыли. Угол внутреннего трения грунта составляет от 30 до 40° ; сцепление в пределах верхних сантиметров поверхности находится в пределах $0,0013\text{—}0,0120 \text{ кг/см}^2$; статическая несущая способность на той же глубине порядка $0,18\text{—}0,68 \text{ кг/см}^2$, а непосредственно на дневной поверхности на порядок

ниже. Так же, как и в земных вулканических районах, наряду с преобладающими базальтовыми породами возможно присутствие в меньших количествах и других вулканических пород типа пемзы и вулканического стекла.

Рассмотренные ранее процессы дегазации поверхности минеральных частиц, воздействие солнечного ветра и других факторов привели к слипанию мельчайших частиц в более крупные агрегаты.

В связи с этим поверхностный слой грунта Луны в настоящее время представляется как зернистый материал, состоящий из частиц широкого гранулометрического спектра, характерных для продуктов механического дробления горных пород. Наиболее мелкие частицы прочно связаны между собой молекулярными силами в местах контактов. Комочки и агрегаты, образованные ими, связаны между собой значительно слабее, а крупные частицы и камни практически не связаны с окружающей массой и могут быть легко оторваны от нее.

На дневной поверхности лежит тонкий слой пыли, который, по-видимому, и обуславливает специфические оптические свойства. Пыль поднимается под действием газовых струй реактивных двигателей и налипает на элементы конструкции космических аппаратов. При этом наблюдается эрозия нижележащего грунта под действием газовых струй. Таков был итог исследований лунных грунтов на июнь 1969 г.

20 июля 1969 г. в Море Спокойствия высадился на Луну экипаж лунной кабины корабля «Аполлон-11». Космонавты собрали образцы лунных камней и мелкозернистого материала в герметичных контейнерах доставили их на Землю.

Нейл Армстронг и Эдвин Олдрин ходили пешком и передвигались прыжками по поверхности Луны. Там они установили научную аппаратуру и отобрали пробы грунта с помощью трубчатых грунтоносов. По высказываниям космонавтов, грунт оказался сыпучим и мягким. При передвижении космонавтов носки их башмаков легко поднимали пыль с поверхности Луны, которая оседала на костюмах. Цвет грунта оказался серовато-коричневым. Когда один из космонавтов втыкал в лунный грунт шест, ему показалось, что он входит в сырую массу.

На лунной поверхности повсеместно разбросаны камни и обломки скал размером до 1 м угловатой и округлой формы. Одни из них лежат на поверхности, другие ча-

стично погребены, а третьи лишь слегка выступают наружу. Поверхностный слой лунного грунта глубиной 5—20 см относительно мягкий: легко поддается разработке, оказывает малое сопротивление вдавливанию и слабо поддерживает с боков колья, флагшток и трубки грунтоноса. На глубине более 20 см от поверхности сопротивление грунта внешним усилиям значительно возрастает.

Глубина следов космонавтов на поверхности Луны составила от нескольких миллиметров до 5 см. Глубина погружения опор лунной кабины в грунт составила 2,5—7,5 см. Мелкозернистый состав и некоторая связность грунта способствовали получению четких отпечатков рельефа подошв ботинок космонавтов. Мелкие зерна грунта слеplены между собой и в некоторых случаях космонавтам было трудно отличить камни от комков, состоящих из слипшихся зерен. Эти комки под ногами космонавтов разрушались.

Космонавтами было собрано три партии образцов лунных пород. Первая партия весом около 1 кг состояла из материала, лежащего на поверхности в 1,5 м от лунной кабины. Первые образцы были собраны в тефлоновый мешочек, чтобы в случае экстренного возвращения на Землю иметь хотя бы минимальное количество лунных пород. Вторая партия лунных пород была собрана позднее с помощью ковша в металлический контейнер, без индивидуального выбора образцов (для увеличения общего количества материала, доставляемого на Землю). Третья партия лунных пород, помещенная также в металлический контейнер, содержала 20 образцов, индивидуально отобранных по усмотрению космонавтов, и два образца мелкозернистого грунта в грунтоносах. Все контейнеры были герметически закрыты и доставлены в приемную лабораторию г. Хьюстона ... (штат Техас, США).

Из предварительных сообщений о результатах лабораторных исследований образцов лунных пород в настоящее время известно следующее [52].

Образцы лунных грунтов, доставленные в лабораторию, делятся на четыре группы:

А. Мелкокристаллические пористые камни вулканического происхождения.

Б. Среднекристаллические камни с пустотами также вулканического происхождения.

В. Брекчии.

Г. Зернистые грунты.

Крупность камневидных образцов групп А, Б и В превышает 10 мм, крупность зерен грунтов группы Г составляет менее 1 мм.

Камни группы А происходят из поверхностных лав или близких к поверхности изверженных пород. Они содержат пирогенные группы минералов и газовые пузыри, которые указывают на кристаллизацию из расплава. Удельный вес темно-серой пористой породы группы А составляет около 3,4 г/см³. Большая часть пор имеет сферическую форму, некоторые — овальную размером 1—3 мм. Встречаются объединенные поры больших размеров. Общая пористость образцов составляет около 15%.

Камни группы Б — темные, коричневато-серые, пятнистые; они отличаются от камней группы А более крупнозернистым строением (размер зерен 0,2—3 мм). Камни группы Б содержат пустоты неправильной формы, внутрь которых прорастают большие кристаллы. Удельный вес породы составляет 3,2 г/см³. С увеличением крупности зерен количество пустот возрастает, а количество пор уменьшается.

Брекчии группы В — серые или темно-серые — представляют собой смесь из обломков каменных пород разных типов. Большинство брекчий состоит из мелких обломков крупностью не более 0,5 мм; лишь немногие из них имеют округлую форму. В брекчиях присутствуют осколки и шарики стекла разного цвета. На поверхности всех камней видны мелкие углубления с остеклованной поверхностью и брызгами стекла. Многие особенности строения брекчий и мелкозема говорят о выдержанном ими оплавлении под действием сильных ударов. Сюда относятся стеклянные слезки, гантельки, пузыристые и слоистые стекла, состоящие не менее чем из двух разновидностей, а также шарики из железа-никеля.

Большая часть углов и кромок камней округлена. Одна из сторон камня бывает плоской, а остальные округленными. Округленность более свойственна брекчиям, чем массивно-кристаллическим обломкам. Все сказанное выше указывает на большую роль метеоритных ударов в формировании поверхностного слоя грунтов Луны.

Зернистый грунт группы Г содержался во всех партиях образцов лунных пород. Кроме того, он был взят грунтоносами с диаметром трубок 2 см. В одной трубке оказался слой грунта высотой 10 см, а в другой — высотой 13,5 см. Крупность частиц в основном колебалась в пре-

делах 0,03—1 мм. В состав зернистого грунта входят угловатые каменные обломки, кристаллические фрагменты, стеклянные шарики и каменно-стеклянные агрегаты в крупных фракциях. Цвет грунта от средне- до темно-серого с коричневым оттенком. После развинчивания трубок грунтоноса образцы пород сохранили цилиндрическую форму. При разрыхлении шпателем материал рассыпался на отдельные зерна или образовывал очень хрупкие агрегаты. В образцах грунта не наблюдалось слоистости.

Объемный вес грунта в трубке № 1 оказался равным 1,66 г/см³, а в трубке № 2 — 1,54 г/см³. Не исключена, однако, возможность искажения истинного объемного веса при отборе образца длинной узкой трубкой грунтоноса. В рыхлом насыпном состоянии объемный вес лунного грунта составляет 1,36 г/см³, в утрамбованном — 1,84 г/см³.

Несмотря на сравнительно высокие значения объемного веса, коэффициент пористости грунта в обеих трубках оказался большим (0,87—1,01), что говорит о рыхлой упаковке зерен.

По приведенному в работе [52] графику гранулометрического состава лунных грунтов можно установить следующие пределы содержания отдельных фракций.

Крупность зерен в мм	>1	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,1	0,1—0,05	0,05—0,01
Содержание в % по весу	0—25	5—6	9—10	19—21	36—37	5—17

При таком гранулометрическом составе все грунты относятся по строительной классификации к пылеватому песку. Возможно, что часть зерен на самом деле представляет собой агрегаты и в действительности содержание мелких частиц в лунном грунте несколько выше указанного.

Определение возраста лунных пород калиево-аргонным методом показало, что изверженные породы кристаллизовались от 3 до 4 млрд. лет тому назад. Присутствие нуклеонидов, образованных космическими лучами, говорит о том, что эти породы находились на глубине до 1 м от поверхности на протяжении от 16 до 20 млн. лет.

Химический анализ 23 образцов показал, что в общем все крупные обломки и мелкие частицы по элементарному составу подобны. Они отличаются от земных пород заметно большим содержанием титана, циркония, иттрия

и хрома и малым содержанием щелочных металлов. Органических веществ содержится значительно менее одной части на миллион частей лунной пыли; биологических материалов обнаружено не было.

Таким образом, в итоге новейших исследований доставленных с Луны образцов лунного грунта видно, что основные его особенности заключаются в химическом составе и высоком удельном весе минералов.

Структурно-механические свойства грунтов оказались примерно такими, как и ожидалось учеными на основании результатов экспериментов, проведенных автоматическими лунными станциями.

19 ноября 1969 г. в Океане Бурь совершила посадку лунная кабина корабля «Аполлон-12». Этот район Луны был предварительно разведан космическим аппаратом «Сервейер-3», в связи с чем представляет большой интерес сравнение результатов прямых исследований лунных грунтов, доставленных на Землю кораблем «Аполлон-12» с результатами, полученными автоматической лунной станцией «Сервейер-3». По заявлениям космонавтов в месте посадки корабля «Аполлон-12» было обнаружено на поверхности много мелкой пыли, которая оседала на костюмах и была занесена в лунную кабину. По заранее намеченной программе были отобраны и точно маркированы образцы лунных пород, а также сфотографированы точки отбора. Предварительные данные, появившиеся в иностранной печати в январе 1970 г., свидетельствуют о том, что возраст лунных пород в точке посадки корабля «Аполлон-12» отличается от возраста пород в Море Спокойствия, где прилунился «Аполлон-11». Космонавты корабля «Аполлон-12» доставили на Землю около 50 кг лунных грунтов, которые поступили на исследование в специальные лаборатории.

Теперь уже с уверенностью можно сказать, что предстоящие полеты на Луну пилотируемых кораблей и автоматических станций дадут огромный поток информации о лунных грунтах. Наступило время, когда можно констатировать, что возникла новая отрасль знания — лунное грунтоведение и механика лунных грунтов, — которая будет развиваться в ближайшие годы быстрыми темпами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов А., Липский Ю. Советские искусственные спутники Луны. «Правда», 1968, 12 апреля.
2. Кротиков В. Д., Троицкий В. С. Радиоизлучение и природа Луны. Успехи физических наук, т. XXXI, вып. 4. Физматгиз, 1963.
3. Baldwin R. B. The face of the Moon. Chicago, The Univ. of Chicago Press, 1949.
4. Urey H. C. The origin of the Moon's surface features. Sky and Telescope, 15, № 3, 1956.
5. The lunar surface layer. Materials and characteristics. ed. by J. W. Salisbury and P. E. Glaser. Acad. Press., New-York and London, 1964.
6. Стапюкович К. П., Федынский В. В. О разрушительном действии метеоритных ударов. Доклады АН СССР, 57, № 2, 1947. Новое о Луне. Изд-во АН СССР, М.-Л., 1963.
8. Луна. Под ред. А. В. Маркова. Физматгиз, 1960.
9. Сытинская Н. Н. Природа Луны. Физматгиз, 1959.
10. Napke B., Van Horn H. Photometric studies of complex surfaces, with application to the Moon. Journal of Geophysical Research, 68, № 15, 1963.
11. Warren C. R. Surface material on the Moon. Science, 140, № 3563, 1963.
12. Барабашев Н. П., Езерский В. И. Фотометрические исследования микрорельефа лунной поверхности. Труды астрономической обсерватории ХГУ, т. 14, 1962.
13. Барабашев Н. П., Чекирда А. Т. О горных породах, наиболее соответствующих тем, которые входят в состав лунной поверхности. Изв. Комиссии по физике планет, № 1, 1960.
14. Jaeger J. C., Harper A. F. Nature of the surface of the Moon. Nature, 166, № 1026, 1950.
15. Марков А. В. Результаты исследования Луны и строение верхнего слоя ее коры. Изв. Главной астрономической обсерватории в Пулкове, т. 24, вып. 2, № 178, 1965.
16. Рускол Е. Л. Физические свойства лунной поверхности. «Космические исследования», т. III, вып. 3, 1965.
17. Шаронов В. В. Природа планет. Физматгиз, 1958.
18. Kuiper G. P. On the origin of the lunar surface features. Proc. Nat. Acad. Sci., USA, 40, № 12, 1954.
19. Lawrence L., Dett P. W. Characterization of lunar surfaces and concepts of manned lunar roving vehicles. SAE Preprints, s. a., № 632L.
20. Барабашев Н. П. Результаты фотометрических исследований Луны и планет на астрономической обсерватории ХГУ. Изд. ХГУ, 1957.

21. Muncey R. W. Properties of the lunar surface as revealed by thermal radiation. *Austral. Journal Phys.*, 16, № 1, 1963.
22. Gold T. The lunar surface. *Monthly Notices, RAS*, 115, № 6, 1955.
23. Firsoff V. A. Is the Moon covered with dust? *Journal Brit. Astron. Assoc.*, 69, № 4, 1959.
24. Gold T. Structure of the lunar surface. Preprint CRSR, Cornell Univ., Ithaca, N. Y., 1963.
25. Марков А. В. Результаты опытных исследований поляризации деталей лунной поверхности. *Изв. Главной астрономической обсерватории*, т. 20, вып. 5, № 158, 1958.
26. Lunar debate still rages despite Ranger. *Aviation Week and Space Technology*, 82, № 17, 1965.
27. Kuiper G. P. Lunar results from Ranger 7 to 9. *Sky and Telescope*, 29, № 5, 1965.
28. Jaffe L. D. Depth of the lunar dust. *Journal of Geophysical Research*, 70, № 24, 1965.
29. Watkins H. D. Ranger 9 data promises basic insights on lunar surface. *Aviation Week and Space Technology*, 82 № 14, 1965.
30. Флоренский К. П. О строении поверхностных слоев Луны по новым данным. *Международный геологический конгресс, 23 сессия. Доклады советских геологов. Проблемы геохимии и космологии. «Наука»*, 1968.
31. Mitchell J. K. Current lunar soil research. *Proceedings of American Society of Civil Engineers. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 90, № 3, part 1, 1964.
32. Johnson R. W. Environmental test criteria for lunar and lunar soils. *Astronautica Acta*, 11, № 4, 1965.
33. Черкасов И. И. Проблемы изучения физико-механических свойств лунных грунтов. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1967, № 1.
34. Vey F. E., Nelson J. D. Engineering properties of simulated lunar soils. *Proceedings of American Society of Civil Engineers. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, № 91, SMI, part 1, 1965.
35. Salisbury J. W., Gleaser P. E., Stein B. A., Vonnegut P. Adhesive behaviour of silicate powders in ultrahigh vacuum. *Journal of Geophysical Research*, 69, № 2, 1964.
36. Hill L. R., Cakmak A. S. The effect of vacuum on the shear strength of an idealized granular medium. *Astronautica acta*, 11, № 4, 1965.
37. Барнетт, Скотт, Джафф, Фрик, Мартенс. Неспособность в вакууме материалов, имитирующих лунную поверхность. «Ракетная техника и космонавтика», т. 2, № 1, 1964.
38. Роды, Риттенгауз, Скотт. Изучение динамической пенетрации в разрушенные породы при атмосферном давлении и в вакууме. «Ракетная техника и космонавтика», т. 1, № 4, 1963.
39. Первые панорамы лунной поверхности. «Наука», 1966.
40. Report on Surveyor Project. *Journal of Geophysical Research*, 72, № 2, 1967.
41. Jaffe L. D. Surface mechanical properties of lunar maria. *Journal of Geophysical Research*, 72, № 6, 1967.
42. Черкасов И. И., Кемурджиан А. Л., Михайлов Л. Н., Михеев В. В., Морозов А. А., Мусатов А. А., Савелко И. А., Смородинов М. И., Шварев В. В. Опре-

деление плотности и механической прочности поверхностного слоя лунного грунта в месте посадки автоматической лунной станции «Луна-13». «Космические исследования», т. V, вып. 5, 1967.

43. Surveyor III. A Preliminary Report. NASA, SP 146, 1967.

44. Виноградов А. П., Сурков Ю. А., Чернов Г. М., Кирнозов Ф. Ф., Назаркина Г. Б. Измерение гамма-излучения лунной поверхности на космической станции «Луна-10». «Геохимия», 1966, № 8.

45. Сурков Ю. А. Новое о лунном вселенстве. «Земля и Вселенная», 1967, № 6.

46. Turkevith A. L., Franzgrote E. I., Patterson I. H. Chemical composition of lunar surface at the Surveyor 5, 6, 7 landing sites. Preliminary results. XI Plenary Meeting of COSPAR. Tokyo, 1968.

47. Surveyor V. Science, 158, № 3801, 1967.

48. Dobar W. I. Simulated basalt and granite magma unmelted in vacuum. Icarus, 5, № 4, 1966.

49. Surveyor VI Mission Report. Part 2: Science Results. California Institute of Technology, Pasadena, California. Technical report, № 32—1262, 1968.

50. Surveyor VII Mission Report. Part 2: Science Results. California Institute of Technology, Pasadena, California. Technical report, № 32—1264, 1968.

51. Surveyor Project Final Report. Part 2. Science Results. California Institute of Technology; Pasadena, California. Technical report № 32—1265, 1968.

52. Preliminary Examination of Lunar Samples from Apollo—11. «Science», 19 september 1969, vol. 165, N 3899.

53. Jaffe L. D. Recent observations of the Moon by spacecrafts. «Space Science Review», 1969, 9, Reidel Publ. Company. Dordrecht Holland.

54. «Зонды» исследуют лунную трассу. «Машиностроение», 1969.

55. Петров Б. Космонавтика: достижения и перспективы. «Правда», 1969, 30 декабря.

56. Цытович Н. А. Механика грунтов «Высшая школа», 1968.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
1. Астрономические и радиоастрономические исследования лунной поверхности	5
2. Гипотезы о происхождении и строении поверхностного слоя Луны	14
3. Результаты фотографирования лунной поверхности с космических аппаратов	21
4. Лабораторные исследования материалов, моделирующих лунные грунты	29
5. Исследование структурно-механических свойств поверхности Луны космическими аппаратами, совершившими мягкую посадку	40
6. Определение химического состава лунных пород с помощью автоматических станций	61
7. Современные представления о структуре и механических свойствах поверхностного слоя Луны	64
Литература	70

НИИ оснований и подземных сооружений
**ПЕРВЫЕ ИТОГИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ЛУНЫ**

* * *

Стройиздат

Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 9.

Редактор издательства *Скворцова И. П.*

Технический редактор *Бочкова Н. Г.*

Корректор *Введенская А. М.*

Сдано в набор 9/IX—1969 г. Подписано к печати 19/III—1970 г.
Т-05414 Бумага 84×108¹/₃₂ д. л. — 1,125 бум. л. 3,78 усл. печ. л.
(уч.-изд. 4,3 л.).

Тираж 4000 экз. Изд. № ИVIII-2069. Зак. 495. Цена 30 коп.

Подольская типография Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
г. Подольск, ул. Кирова, д. 25.