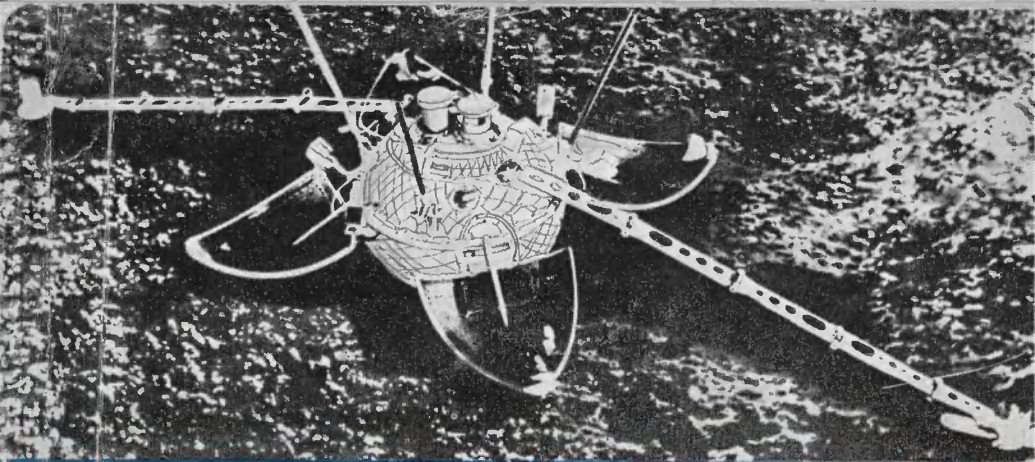
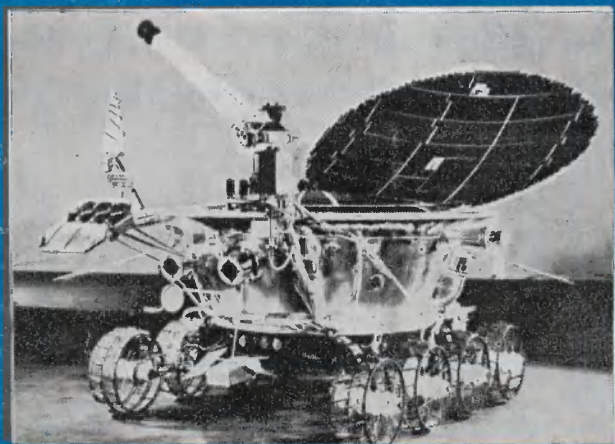




И. И. ЧЕРКАСОВ, В. В. ШВАРЕВ

ГРУНТОВЕДЕНИЕ ЛУНЫ



АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ
ИМ. О. Ю. ШМИДТА

И. И. ЧЕРКАСОВ, В. В. ШВАРЕВ

ГРУНТОВЕДЕНИЕ ЛУНЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1979

Черкасов И. И., Шварев В. В. Грунтоведение Луны. М.: Наука, 1979, 232 с.

Книга подводит итоги десятилетним исследованиям грунтов Луны, рассматриваемых как объекты инженерной деятельности человека. Главное внимание уделено лунному реголиту. Охарактеризованы специфические методы лунного грунтоведения, использующие прямые и косвенные приемы, оптические и радиофизические приборы и инструменты, автоматику, телемеханику и космическую технику, рассчитанные на работу в условиях лунного окружения.

Описаны исследования, проведенные станциями «Луна» и «Сервейер», передвижными лабораториями «Луноход» и экспедициями «Аполлон», а также исследования лунных образцов в земных лабораториях. Систематизированы и обобщены их результаты. Особое внимание уделено использованию земных пород и материалов, моделирующих лунные грунты. Рассматриваются возможные способы улучшения природных свойств реголита, а также новейшие данные о свойствах грунтов планет.

Книга рассчитана на широкие круги читателей, интересующихся вопросами освоения космоса, и специалистов, работающих в области изучения грунтов Луны и Земли.

Ответственный редактор

доктор физ.-мат. наук

В. Н. ЖАРКОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Доставкой на Землю образцов лунного грунта, взятых советской автоматической станцией «Луна-24» в августе 1976 г., закончилось первое десятилетие прямых исследований поверхности Луны, которое было начато мягкой посадкой «Луны-9» в феврале 1966 г. За это время автоматические лунные станции, автоматические передвижные лаборатории луноходы (СССР) и лунные экспедиции «Аполлон» (США) провели много разнообразных исследований поверхностного слоя горных пород Луны, осуществили бурение на глубину до 3 м и доставили в земные лаборатории сотни килограммов образцов.

В связи с этим лунное грунтоведение, зародившееся всего 12 лет назад, развилось в настоящее время в самостоятельную отрасль общего грунтоведения, которая заслуживает подведения итогов своего первого этапа.

Как и на Земле, грунтами называются на Луне любые горные породы, доступные инженерной деятельности человека, и в первую очередь лунный реголит — дисперсный грунт, подверженный воздействию метеоритов, солнечной и космической радиации.

В книге рассматриваются в основном механические свойства лунных грунтов, которые определяют условия посадки и движения по Луне, обуславливают возможность и методы возведения различных площадок, укрытий и сооружений. Описаны косвенные — астрономические и радиоастрономические — методы изучения грунтов Луны, работы, проведенные автоматическими станциями на ее поверхности в местах посадки и на пути следования самоходных аппаратов, лунных экспедиций и автоматов, производивших отбор проб для доставки на Землю. Специальные главы посвящены изучению образцов в земных лабораториях и опытам с земными аналогами лунных грунтов.

Приборы и методы, впервые специально созданные для этих исследований, используют последние достижения машиностроения, автоматики, телемеханики и телеметрии, которые открывают новые возможности и для разработки приборов, предназначенных для изучения грунтов Земли. Применение таких приборов и методов позволит ускорить, удешевить и сделать более на-

дежными инженерно-геологические и грунтоведческие работы, особенно в труднодоступных районах Земли.

В связи с этим книга, рассчитанная в первую очередь на читателей, интересующихся вопросами исследования Луны, представляет также интерес для гораздо большего круга людей, связанных с грунтоведением и изучением грунтов Земли.

В конце книги приводятся данные о перспективах искусственного улучшения инженерно-физических свойств грунтов Луны путем их укрепления и уплотнения, которые могут приобрести важное практическое значение на дальнейших этапах ее освоения человеком. Приложение кратко освещает первые результаты исследования свойств грунтов Меркурия, Венеры и Марса.

При работе над книгой были использованы многочисленные отечественные и зарубежные источники. Справочные данные по грунтам, приведенные в книге, соответствуют опубликованным в научной печати по состоянию на 31 декабря 1977 г.

При проведении исследований и публикации результатов авторы книги пользовались советами и поддержкой академиков А. П. Виноградова, П. А. Ребиндера, которые всегда проявляли интерес к вопросам грунтоведения Луны. Авторы испытывают чувство глубокой признательности к этим ученым за их неоценимую помощь.

ПРЕДМЕТ ИЗУЧЕНИЯ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ГРУНТОВЕДЕНИЯ ЛУНЫ

1.1. Предмет изучения

Общее грунтоведение представляет собой дисциплину, связывающую науки о Земле с механико-математическими науками, а точнее, инженерную геологию с механикой грунтов. Оно было создано трудами советских ученых Н. Н. Иванова, М. М. Филатова, В. В. Охотина, С. С. Морозова, Е. М. Сергеева и ряда других для решения связанных с грунтом задач промышленного, дорожного и гидротехнического строительства в СССР, которые возникли перед страной в 30-х годах нашего века.

На Земле грунтами называют «любые горные породы и почвы, изучающиеся как возможный объект инженерной деятельности человека» [1]. Земные грунты размещены преимущественно в пределах коры выветривания и с учетом горных выработок и буровых скважин охватывают толщу в несколько километров.

Грунтоведение вооружает инженера такими знаниями о грунтах, которые позволяют на основании геологических данных и определений их состава, физических и химических свойств устанавливать механические свойства, нужные для использования грунтов в качестве среды, основания или материала для строительства сооружений и для работы горнодобывающих, строительных и транспортных систем.

Лунное грунтоведение, полностью базируясь на общем грунтоведении, дополняет и развивает последнее в той мере, которая определяется различиями в свойствах лунных и земных грунтов, условиях и целях их использования человеком.

В период с 1966 по 1976 г. на Луну опустились 13 автоматических научных станций и 6 пилотируемых кораблей. По ее поверхности прошли два самоходных автоматических аппарата и совершили поездки три лунохода, управляемые космонавтами. В девяти разных районах Луны были собраны и затем доставлены на Землю образцы лунных пород. В шести пунктах было осуществлено бурение разведочных скважин (рис. 1.1). И при всем том человек лишь коснулся верхнего покрова Луны и углубился в него не более чем на 3 м.

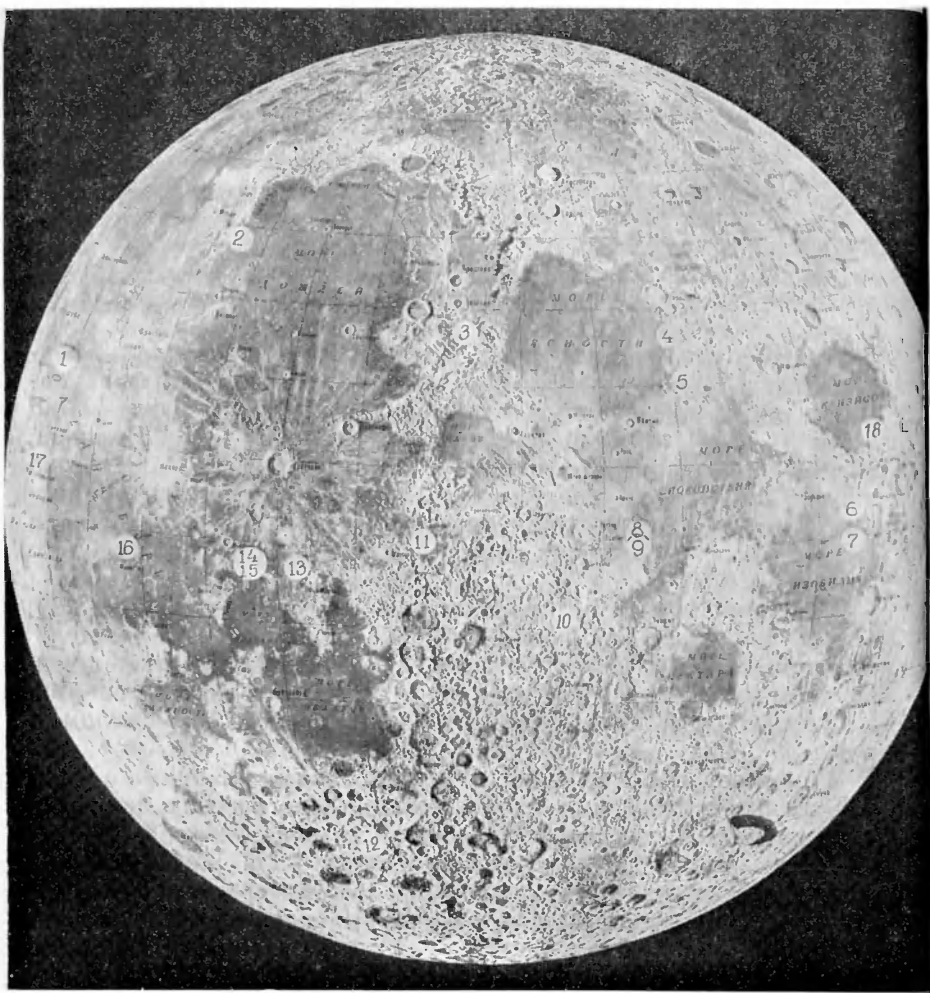


Рис. 1.1. Места посадки автоматических лунных станций и космических кораблей

1 — «Луна-13»; 2 — «Луноход-1»; 3 — «Аполлон-15»; 4 — «Луноход-2»; 5 — «Аполлон-17»; 6 — «Луна-20»; 7 — «Луна-16»; 8 — «Сервейер-5»; 9 — «Аполлон-11»; 10 — «Аполлон-16»; 11 — «Сервейер-6»; 12 — «Сервейер-7»; 13 — «Аполлон-14»; 14 — «Сервейер-3»; 15 — «Аполлон-12»; 16 — «Сервейер-1»; 17 — «Луна-9»; 18 — «Луна-24»

В ближайшем будущем человек будет воздействовать на горные породы Луны своими космическими кораблями, лунными транспортными средствами и научными приборами, а также использовать их как основания строительных конструкций и среду для устройства небольших подземных сооружений. В этом

случае грунтами Луны нужно будет считать верхний слой скальных и дисперсных пород толщиной в несколько метров. Бурение будет осуществляться, видимо, на глубину в десятки метров.

Свойства грунтов, проявляющиеся в их взаимодействии с механизмами и при использовании в строительстве, определяются их происхождением, составом, условиями формирования и природного залегания, которые на Луне отличаются от земных. Происхождению Луны, ее космохимии и геологии, петрографии и минералогии лунных пород посвящена обширная литература, в значительной части созданная советскими учеными во главе с академиком А. П. Виноградовым [2—9].

Детальная характеристика всех минералов, обнаруженных в образцах лунных пород, доставленных экипажами кораблей «Аполлон» и автоматическими станциями «Луна-16 и -20», дана в монографии Д. Фрондейл [4]. Это, по сути дело, справочник по минералам, встречаемым на Луне. В книге использованы результаты комплексных анализов и определений более чем 100 минералов. В связи с выпуском советского перевода этой книги в 1978 г. сведения о минералогии Луны в нашей книге приводятся в минимальном объеме.

Отсылая к первоисточникам читателей, интересующихся этими вопросами, мы ограничимся ниже сводкой некоторых данных о Луне, без которых нельзя обойтись при рассмотрении лунных грунтов. Более подробные сведения приводятся в использованных нами в связи с этим работах [7—10].

Луна обращается вокруг Земли по орбите, близкой к эллиптической, со средним удалением 384 400 км и периодом 27,32 средних солнечных суток. По форме она близка к шару, но слегка яйцевидна, с острым концом, всегда обращенным в сторону Земли. Основные характеристики Луны в абсолютных цифрах и по сравнению с земными следующие:

Диаметр	3474 км	или	0,27 земного
Масса	$7,35 \cdot 10^{25}$ г	или	0,01 земной
Плотность	3,34 г/см ³	или	0,61 земной
Ускорение силы тяжести на поверхности Луны	162 см/с ²	или	0,16 земного
Первая космическая скорость	1,68 км/с	или	0,21 земной
Вторая космическая скорость	2,36 км/с	или	0,21 земной

Поверхность Луны в целом делится на два типа. Один из них, занимающий 85% ее площади, характеризуется сравнительно светлой окраской и пересеченным рельефом, второй — более темным цветом и ровной поверхностью (рис. 1.2). Светлые области условно называют материковыми, а темные — морскими. «Моря» преобладают на видимой стороне Луны. Обратная сторона преимущественно занята материками.

Наиболее характерными элементами лунного рельефа являются кратеры. В материковых областях их в среднем в 15 раз

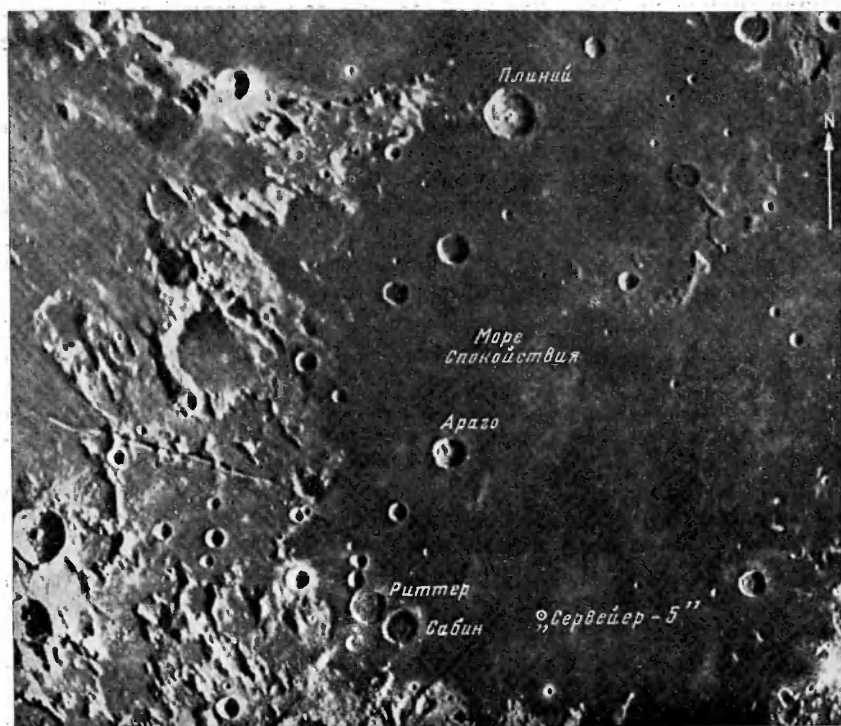


Рис. 1.2. Море Спокойствия и прилегающая горная область

больше, чем в морских. Диаметры кратеров достигают 80—200 км, а превышение вала над дном крупных кратеров доходит до 6 км. Главная причина возникновения кратеров — удары метеоритов. Кратеры очень разнообразны по своим размерам. Наименьшие из них встречаются даже на поверхности мелких минеральных частиц и видны только под микроскопом.

По современным представлениям материковые участки самого верхнего слоя поверхности Луны сложены в основном обломками наиболее древних анортозитовых, норитовых и троктолитовых пород, сцементированных в брекчии перетертой и частично расплавленной массой, в которой содержатся примеси метеоритного вещества. Брекчии возникли в результате интенсивных метеоритных бомбардировок 3,8—4,4 млрд. лет тому назад в период образования кратеров.

Возраст лунных морей оценивается в 3,1—3,8 млрд. лет, а происхождение их связывают с массивными излияниями базальтовых лав из недр Луны. Породы, слагающие лунные моря, магматического происхождения и представлены базальтами, в об-

щем похожими на земные, но отличающимися от них низким содержанием воды, углекислоты и трехвалентного железа. Меньшее число кратеров в лунных морях свидетельствует, видимо, о том, что после их возникновения интенсивные метеоритные бомбардировки Луны уже не повторялись. Отметим, что на территории лунных морей обнаружены кое-где вулканические образования и присутствие вулканических пород на Луне не исключено.

После образования морей развитие Луны вступило в новую стадию. Роль внутренней энергии ослабла, и основное влияние приобрели внешние воздействия. Малая скорость убегания и высокая дневная температура способствовали тому, что Луна не могла удержать сколько-нибудь ощутимой атмосферы и ее поверхность была на протяжении миллиарда лет открыта воздействию экзогенных факторов, которых нет на Земле. Главным из них является непрерывная бомбардировка небольшими метеоритами и микрометеоритами, представляющими собой частицы твердого космического вещества. Соударение метеоритов с Лунной происходит со средними скоростями около 20—30 км/с и сопровождается выделением огромной кинетической энергии (превосходящей, например, в 3 раза химическую энергию, выделяемую при взрыве такого же по массе количества нитроглицерина). В результате соударения метеоритов с поверхностью Луны возникают переплавление, сжатие и разрывы грунта, вызывающие измельчение и разброс частиц, а также образование их конгломератов и изменение структуры. При ударе во взаимодействие с метеоритными частицами вступает масса грунта, на несколько порядков превышающая массу падающей частицы. Поэтому ударное преобразование горных пород, по мнению многих ученых, является одним из наиболее характерных геологических процессов, обуславливающих структуру лунных грунтов.

В результате систематической бомбардировки поверхности Луны твердыми частицами верхний слой грунта перемешивается и измельчается, при этом наибольшему измельчению и перемешиванию подвержены ближайшие к поверхности слои. Это происходит потому, что мелкие метеориты падают значительно чаще, чем крупные, хотя энергия их соударения с поверхностью и соответственно масса и глубина вовлекаемого во взаимодействие слоя лунного грунта существенно меньше.

Следующим фактором, также в какой-то мере вызывающим размельчение лунных пород, является нагревание и охлаждение поверхности Луны. Из-за отсутствия защитной газовой и водной оболочек температура на поверхности Луны в среднем изменяется от $+130^{\circ}\text{C}$ днем до -170°C ночью. Средний градиент изменения температуры невелик и равен примерно 9° в час, однако во время лунных затмений он может достигать 200° в час.

Поверхность Луны не защищена от воздействия ультрафиолетового излучения и солнечного ветра, представляющего собой

потоки электронов и протонов различной энергии, а также от космических лучей. Эти факторы могут вызвать разрушение кристаллической структуры частиц грунта и размельчение его. Однако, по-видимому, более существенна роль этих излучений в сильной активации лунной поверхности с образованием на ней свободных валентностей и электрических зарядов, долгоживущих в условиях сверхвысокого вакуума и способствующих цементации частиц грунта.

Сверхвысокий вакуум также является важнейшим фактором лунной среды. По существующим представлениям вакуум на поверхности Луны достигает 10^{-10} — 10^{-16} мм рт. ст. Он может быть причиной склонности мелкораздробленных частиц лунного грунта к адгезии (слипанию) под действием межмолекулярных сил, возникающих при соприкосновении чистых поверхностей минералов, лишенных адсорбированных пленок паров и газов, всегда присутствующих на зернах грунтов Земли.

Наконец, надо напомнить о низком значении силы тяжести, благодаря которому действующий вес лунных грунтов при одинаковой плотности в 6 раз меньше, чем на Земле. Это уменьшает несущую способность грунтов, способствует более рыхлому их залеганию и уменьшает давление на ограждения и подземные сооружения.

Еще задолго до начала исследований Луны автоматическими станциями многие ученые высказывали гипотезы о происхождении и структуре лунных грунтов. Ниже приводится их обзор из работы [11].

Гипотеза пылевого грунта. По этой гипотезе, предложенной Т. Голдом, равнины лунных морей принимались за бассейны, заполненные пылью. Предполагалось, что толщина слоя пыли в них могла достигать многих километров. Основной причиной дробления лунных горных пород и накопления пыли считались удары метеоритов, в частности микрометеоритов. Принимая во внимание, что эти удары могли наноситься с космическими скоростями, Голд считал, что суммарный эффект от их действия на протяжении длительного времени может быть весьма существенным. В результате эрозии могли происходить постепенное измельчение лунных пород, скол и перенос продуктов дробления в пониженные места, что могло вызвать постепенное разрушение и сглаживание горных образований.

Гипотеза рыхлого связного грунта. Б. Хапке и Х. Ван Хорн, С. Уоррен, а затем и другие ученые развили и дополнили первоначальную гипотезу пылевого грунта. Они пришли к выводу, что поверхностный слой состоит из мелкодисперсных пылеватых частиц, образовавшихся в результате ударов микрометеоритов и метеоритов и затем связанных между собой в местах контактов вследствие высокой чистоты поверхности частиц в вакууме и действия космической радиации. Структура такого рода грунта должна напоминать смерзшийся сухой снег. Частицы грунта,

оседают в местах их накопления, цементируются в точках контактов и образуют сверхрыхлые структуры, обладающие свойствами твердого тела. Со временем прочность этих структур должна возрастать в результате действия солнечного ветра, протонной и электронной бомбардировки. В месте удара протона происходит локальное разогревание малого участка поверхности, вызывающее испарение атомов и молекул, которые через некоторое время оседают и цементируют вещество.

Лунный грунт может быть более рыхлым с поверхности и постепенно уплотняться с глубиной в результате воздействия микрометеоритов и веса вышележащих слоев.

Гипотеза грунта из крупнообломочного минерального вещества. Сторонники этой гипотезы также считали, что формирование лунного рельефа происходит главным образом под действием ударов метеоритов, в результате чего образуется слой крупнообломочного и пылевого вещества. По расчетам Дж. Салисбери и В. Смолли, осредненная толщина обломочного слоя в области лунных морей может равняться примерно 10 м, но, поскольку 95% выброшенной породы концентрируется у гребня кратера, межкратерное пространство должно быть покрыто слоем обломков толщиной в среднем меньше 1 м. Максимальная толщина крупнообломочного слоя может измеряться десятками и сотнями метров, особенно в непосредственной близости от больших кратеров.

Строение крупнообломочного слоя неоднородно по глубине и простираению вследствие повторных ударов метеоритов и крупных глыб, выброшенных из соседних кратеров, а также оседания пыли. В крупнообломочном слое наряду с очень большими глыбами (5—20 м) должны встречаться камни, щебень, песок и пыль всех фракций. На внешней поверхности везде должен лежать слой рыхлого легкого пористого материала. Продолжающиеся все время удары более крупных метеоритов постоянно деформируют уже сложившуюся толщу. В результате крупнообломочные пласты переслаиваются с пылевыми и разрез в целом приобретает сложное строение.

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

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, непеработанной скальной породы, представляющей собой, возможно, лавовые излияния. 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 материалов верхнего покрова Луны.

Чаще высказывались предположения о ноздреватой структуре наружного слоя, сходной с застывшими лавовыми покровами на Земле, поверхность которых покрывается валами, ячейками, углублениями и порами. Н. П. Барабашев, допускавший возможность разрушения и измельчения магматических пород, высказывал также предположения о наличии на Луне локальных выходов на поверхность коренных скальных пород или о присутствии маломощного (3—10 см) покрова пыли на твердом скальном основании.

Все перечисленные взгляды были высказаны до того, как на Луну опустили автоматические станции и высадились астронавты.

В настоящее время лунные грунты можно охарактеризовать так.

Коренными породами в горных районах Луны являются брекчии преимущественно анортозитового состава, а в морских — базальтовые лавы. Местами они выходят на поверхность и образуют крупные обломки, выбрасываемые из ударных кратеров. Выше лежит мелкодисперсный слой лунного реголита, образовавшийся в результате метеоритной переработки и других внешних воздействий из коренных пород. Глинистых и органогенных грунтов, свободной воды и льда на поверхности Луны нет. Возможно присутствие вулканических пород и метеоритного вещества. Дневная поверхность почти везде покрыта реголитом, который и следует считать первоочередным объектом изучения грунтоведения Луны.

1.2. Задачи грунтоведения Луны

На Земле грунтоведение изучает в первую очередь генезис, состав, структуру и текстуру грунтов и с их учетом определяет их свойства, проявляющиеся при использовании человеком в качестве окружающей среды, оснований или материалов сооружений. На базе данных, получаемых грунтоведением, опреде-

ляются механические параметры грунтов, которые кладут в основу расчета грунтовых оснований и сооружений и прогнозов их поведения в течение срока эксплуатации.

На Луне, во всяком случае в ближайшее время, грунтоведение будет привлекаться к решению задач, связанных с движением людей и механизмов по грунту, проектированием машин для разработки, перемещения и уплотнения лунного грунта, и к созданию научных приборов для всестороннего изучения лунных грунтов как на месте природного залегания, так и в лабораториях на Земле. В более далекой перспективе выдвигнутся на первый план сходные с земными задачи научного обеспечения строительства на лунных грунтах и их технической мелиорации.

Пока задачи лунного грунтоведения более ограничены, чем на Земле. Кроме того, существует ряд обстоятельств, которые упрощают некоторые исследования лунных грунтов по сравнению с теми, которые проводятся на Земле. Например, из числа широко распространенных на Земле минеральных образований: первичных силикатов, простых солей, глинистых минералов и органических веществ — на Луне обнаружены главным образом первые. Поэтому различия в минералогических составах лунных грунтов значительно меньше выражены, чем у земных, и для решения обычных задач инженерной практики очень глубокого изучения минералогии грунта не требуется.

Далее, в общем грунтоведении совершенно обязателен генетический подход к изучению грунтов, который требует учета влияния многих весьма сложных физических, химических, биологических и антропогенных факторов на процессы формирования грунтов. На Луне большинство этих факторов отсутствует и основной процесс образования реголита сводится в первом приближении к механическому измельчению и перемешиванию обломков первичных пород ударами метеоритов с сопутствующим воздействием тепла и космической радиации.

Общее грунтоведение уделяет равное внимание изучению механических, физических и физико-химических свойств грунтов, а также взаимодействия грунтового скелета и влаги. На поверхности Луны влаги нет и все процессы, связанные с ее действием на грунт, исключены. То же относится и к обычным для Земли химическим реакциям во влажных грунтах.

К первоочередным задачам грунтоведения Луны относится выдача исходных данных для проектирования космических аппаратов, совершающих посадку на Луну при скорости подлета, измеряющейся метрами и десятками метров в секунду, и отсутствии атмосферы. Эта тема в отечественной литературе достаточно подробно рассмотрена в книге В. И. Баженова и М. И. Осина [12]. В расчетах взаимодействия аппарата с лунной поверхностью авторы используют общепринятые параметры механики грунтов, а структуру грунта характеризуют пористостью. Естественно, что для достоверного определения этих

свойств надо уметь исследовать грунты на Луне и в земных лабораториях, в условиях, моделирующих лунные, а для этого требуется освоение совершенно новых методов, не находивших применения в общем грунтоведении.

1.3. Методы исследований

Во всех тех случаях, когда лунное вещество можно изучать в обычных атмосферных условиях Земли, вполне применимы общепринятые методы исследования. В частности, это относится к определению состава, структуры и текстуры. Здесь особенно уместно применение растровой электронной микроскопии и современных методов анализа, требующих минимальных доз изучаемого вещества.

Ниже будет идти речь исключительно о тех исследованиях, которые ведутся на Луне или в условиях, имитирующих лунные.

Однако сначала нужно указать на астрономические, радиоастрономические и радиолокационные методы изучения поверхностного слоя лунных грунтов в земных лабораториях. К ним примыкают дистанционные методы изучения поверхности по телевизионным снимкам с космических аппаратов, направляемых к Луне или являющихся искусственными спутниками Луны. Наконец, к этой же группе методов относится и дистанционная гамма-спектроскопия горных пород Луны, также осуществляемая космическими средствами. Обзор таких исследований приводится в главе 2.

Следующая группа методов связана с использованием автоматических лунных станций, совершающих посадку на поверхности Луны. Эти станции оснащены телевизионной аппаратурой и способны передавать на Землю крупномасштабные снимки поверхности грунта с разрешением не хуже 1 мм, что дает богатую информацию о строении грунта и влиянии на него всевозможных внешних воздействий. На автоматических станциях очень широко используются косвенные методы оценки свойств грунтов — по глубине вдавливания опор при посадке, по глубине следов космонавтов и колес лунных транспортных средств, по следам воздействия на грунт газовых струй. На некоторых станциях были установлены и специальные приборы для определения химического состава, плотности и механических свойств лунных грунтов (см. главы 3 и 4).

Лабораторные исследования образцов реголита, доставленных на Землю, потребовали создания сложных вакуум-камер с аппаратурой для комплексных испытаний грунтов. В этих камерах вакуум достигал 10^{-10} мм рт. ст., а температуру можно было менять в пределах от -140 до $+850^\circ\text{C}$. Были построены специальные микроминиатюрные приборы, в которых можно определять механические свойства грунтов на пробах массой 1—2 г. Эти установки и приборы описаны в главе 6.

Наконец, необходимо сказать о научном снаряжении экипажей лунных экспедиций «Аполлон», в комплект которого входили пенетрометры, инструменты для разработки грунта, грунтозаборные приспособления, буровые снаряды, фотокамеры для обычных съемок и для крупномасштабных стереосъемок поверхности грунта. В этих экспедициях проводились также наблюдения за погружением опор кораблей в грунт и деформациями поверхности при движении луноходов (см. главу 5).

Огромное число опытов, проводившихся при разработке посадочных систем лунных станций, шасси луноходов, снаряжения космонавтов, требовало использования больших масс грунта, который в земных условиях максимально приближался бы по своим свойствам к лунному. Оказалось необходимым создание больших полигонов под открытым небом, закрытых стендов и лабораторных установок, использовавших земные аналоги лунных грунтов. Подбор, всестороннее изучение и рекомендации по практическому использованию грунтов-аналогов являются характерными особенностями лунного грунтоведения (см. главы 7 и 8).

Подводя итоги сказанному, можно дать следующее определение развиваемому направлению.

Грунтоведение Луны изучает поверхностную толщу дисперсных и скальных лунных пород, могущих служить объектами инженерной деятельности человека. Оно связывает инженерную геологию и механику лунных грунтов, исследует их генезис, состав, структуру и определяет механические параметры для расчета грунтовых оснований, сооружений, дорог и разработки механизмов, взаимодействующих с грунтами на Луне.

В грунтоведении Луны широко применяются дистанционные и косвенные методы исследования и сложная космическая техника. Его характерной особенностью является использование земных аналогов лунных грунтов при проведении крупномасштабных экспериментов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУННЫХ ГРУНТОВ
КОСВЕННЫМИ МЕТОДАМИ

2.1. Астрономические и радиофизические данные

Луна на протяжении всей истории человечества привлекала внимание людей. Однако только с изобретением телескопа и разработкой начал небесной механики стало возможным получение объективных данных о ее размерах, массе, строении поверхности и оптических свойствах поверхностного грунтового слоя. Первым указанием на значительные различия между лунными и земными горными породами и образованными из них грунтами явилось, по-видимому, установление средней плотности Луны. Она оказалась равной $\rho = 3,34 \text{ г/см}^3$, в то время как средняя плотность Земли $\rho = 5,52 \text{ г/см}^3$. Одной из вероятных причин такой разницы может быть наличие пустот и пор различных размеров. Эти цифры легли в основу самых ранних высказываний относительно пористого строения Луны и малой плотности ее поверхностного слоя.

Вторым аргументом в пользу весьма пористого рыхлого строения грунтов Луны послужили результаты исследования оптических свойств ее поверхности. Оказалось, что при очень низком альбедо отражение солнечного света, падающего на лунную поверхность, происходит таким образом, что наибольшая яркость отмечается в направлении Солнца. Благодаря этому лунный шар кажется при визуальном и телескопическом наблюдении плоским диском, он не имеет яркого блика в центре и существенного потемнения к краю диска. Галилей объяснял это явление тем, что лунная поверхность иссечена мелкими неровностями, лежащими за пределами разрешающей силы телескопа. Позднее многие астрономы пришли к выводу о том, что поверхность Луны покрыта многочисленными впадинами и выступами с крутыми стенками; возможно, что она имеет строение, подобное губке или вулканическому шлаку, или образована из мельчайших частиц, связанных между собой в точках контактов в сложную дендритную структуру с большой пористостью, которая поглощает большую часть падающего света и отражает остаток преимущественно назад по направлению к источнику света. Фотометрические исследования лунной поверхности, проводившиеся параллельно с такими же исследованиями различных земных горных пород, показали, что лучше всего лунным породам со-

ответствуют туфолавы, вулканические шлаки, пемзы и туфы, находящиеся в раздробленном состоянии [13]. Полной аналогии, однако, установить не удалось, и по оптическим свойствам среди материалов земного происхождения еще не найдены эквиваленты лунных грунтов. Ряд дополнительных данных получен при исследовании поляризации света, отраженного Луной. Из земных пород по поляризационным показателям ближе всего к лунному грунту мелкий вулканический пепел, зерна которого объединены в более крупные агрегаты. По этим же данным на поверхности Луны должны отсутствовать большие обнаженные чистые поверхности массивно-кристаллических горных пород.

Весьма существенное значение для познания свойств грунтов Луны имели измерения температуры ее поверхности во время смены фаз и особенно при лунных затмениях. Эти измерения показали, что температура поверхности очень быстро изменяется при изменении солнечного освещения. По-видимому, колебания температуры распространяются не глубже чем на несколько десятков сантиметров при амплитуде изменения температуры поверхности в 300°C ($-170^{\circ} - +130^{\circ}$). Это может иметь место только при крайне низкой теплопроводности и малой теплоемкости поверхностного слоя, что опять-таки свидетельствует о его малой плотности и высокой пористости. На основании данных измерения температуры лунной поверхности сделаны выводы о том, что она состоит либо из пенистого минерального вещества типа пемзы или шлака, либо из весьма рыхлого мелкозернистого грунта.

Капитальный вклад в дело изучения поверхности Луны астрономическими методами внесли советские ученые Н. П. Барашов, А. В. Марков, Н. С. Орлова, Н. Н. Сытинская, В. Г. Фесенков, А. В. Хабаков, В. В. Шаронов и др. Советским астрономам принадлежат оригинальные и глубоко обоснованные гипотезы о структуре и составе лунных грунтов [13—19]. Значительные работы в этом направлении выполнены и за рубежом, где также разрабатывались различные взгляды, касающиеся происхождения, строения и физических свойств поверхностного слоя Луны. Подробные сведения о взглядах зарубежных ученых приводятся, например, в работах Р. Болдуина, Г. Койпера, З. Копала, Г. Юри [20—24].

Развитие радиофизики и радиоастрономии дало возможность перейти к изучению лунного грунта до глубины нескольких метров от поверхности Луны. Многолетние разносторонние тонкие исследования этими методами проделаны в СССР В. С. Троицким и его сотрудниками, которые в ряде работ последовательно вскрывали строение верхней оболочки Луны. Весьма обстоятельный обзор этих исследований с обширным списком литературы дан в работе В. С. Троицкого и Т. В. Тихоновой [25] (см. также [26]).

Таблица 2.1

Свойства лунной поверхности по данным радиофизических исследований

Наименование слоя	Глубина z , см	Плотность ρ , г/см ³	Коэффициент пористости ε
Пористая поверхность	0—4	0,5—0,9	4,0
Пористый слой	4—400	0,9—1,2	1,5
Переходный слой	400—600	1,5—2,0	0,43
Скальные породы	>600	2,5—3,0	0—0,11

Производились измерения собственного радиоизлучения Луны в различных диапазонах и исследования процесса отражения радиоволн разной длины от ее поверхности. Данные измерений интенсивности собственного излучения Луны на разных волнах соответствуют изменению температуры на разных глубинах. С увеличением длины волны принимаемого излучения происходит как бы зондирование лунного грунта по глубине. Исследования коэффициента отражения радиоволн от поверхности Луны позволяют уточнить неоднородность верхнего слоя по глубине. Измерения в диапазоне инфракрасных излучений и измерения температуры поверхности Луны днем, ночью и во время затмений дают ценную информацию о тепловых свойствах грунтов. По совокупности всех перечисленных данных может быть также оценен химический состав лунных грунтов и определены образующие их минералы.

На основании своих исследований В. С. Троицкий, В. Д. Кротиков и их сотрудники сделали вывод о том, что поверхностный слой Луны состоит из силикатных пород с содержанием SiO_2 , составляющим 54—60%, и Al_2O_3 — 14—17%. Слой этот пористый, с коэффициентом пористости ε порядка единицы. Размеры частиц колеблются от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров, т. е. относятся в основном к пылеватым фракциям.

По последним данным этих исследователей в пределах от дневной поверхности до глубины более 6 м покров Луны состоит из четырех слоев, обладающих следующими свойствами (табл. 2.1).

Поверхностный слой Луны на глубину до 10 см оказался, по тем же данным, однородным по всей поверхности Луны, однако плотность его в районе лунных морей, по-видимому, несколько больше, чем в материковых районах.

Анализом отраженных сигналов при радиолокации Луны установлено, что поверхность Луны слабоволнистая, в общем ровная, с неровностями менее 1 м и уклоном от 0,05 до 0,1, причем около 10% ее занято объектами, размер которых не менее длины волн локатора (от 10 до 300 см). Не исключена возможность су-

Таблица 2.2

Свойства лунной поверхности по результатам астрономических и радиоастрономических исследований [11]

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 0,05 до 0,1. Низкая плотность поверхностного слоя
Радиоизлучение	Малая теплопроводность и высокая пористость образований, слагающих лунную поверхность
Альбедо	0,05—0,18
Цвет	Коричневато-серый или черновато-бурый

существования больших камней и обломков крупностью от 1 до 100 м.

Астрономическим и радиоастрономическим исследованиям поверхности Луны посвящено много работ. Обзорные статьи и главы, посвященные этим вопросам, опубликованы в работах [15, 16, 20, 23, 26, 28—31]. Поэтому нет необходимости углубляться в дальнейшее рассмотрение результатов астрономических и радиофизических исследований, и мы ограничимся тем, что приведем их сводку из работы [11] (табл. 2.2).

2.2. Съёмки поверхности Луны с космических аппаратов¹

2 января 1959 г. в СССР был осуществлен запуск первой космической ракеты, которая в конце активного участка своего полета достигла второй космической скорости 11,2 км/с и вышла из сферы притяжения Земли. На этой ракете был установлен аппарат «Луна-1», который прошел на расстоянии 5000—6000 км от Луны и провел ряд исследований газового и твердого веществ, магнитного поля, корпускулярного излучения Солнца и первичного космического излучения на трассе Земля—Луна. Так был открыт новый этап исследований Луны с помощью кос-

¹ Более подробные данные приводятся в работах [22, 31—38]. В настоящем разделе и далее автоматическими лунными станциями названы прилуняющиеся, а космическими аппаратами — пролетающие и орбитальные системы.

мических аппаратов, совершавших облет Луны или достигавших ее поверхности без торможения, и автоматических лунных станций, которые мягко прилунились и в течение длительного времени передавали различную информацию с поверхности Луны.

14 сентября 1959 г. достиг Луны советский аппарат «Луна-2».

7 октября того же года аппарат «Луна-3» произвел облет Луны и сфотографировал ее обратную сторону. Это был первый опыт изучения другого небесного тела с борта космического аппарата.

Дальнейшее дистанционное изучение Луны и окололунного пространства производилось орбитальными космическими аппаратами «Луна-10 — 12, -14, -15», запущенными Советским Союзом в период с 1966 по 1969 г. В США были осуществлены запуски в сторону Луны космических аппаратов «Рейнджер» (1964—1965 гг.), которые на участке подлета к Луне передали большое количество телевизионных изображений лунной поверхности крупного масштаба и разбились при посадке. В период с 1966 по 1967 г. в США были проведены запуски аппаратов серии «Лунар-Орбитер», летавших по селеноцентрическим орбитам и производившим телевизионную фотосъемку поверхности Луны с близких расстояний [38].

Начиная с 1964 г. Советским Союзом проводятся запуски космических аппаратов типа «Зонд» [34—36, 39]. «Зонд-3», пролетавший около Луны 20 июля 1965 г., сфотографировал часть ее поверхности как с видимой, так и с обратной стороны, что позволило создать глобус и атлас Луны. Аппараты «Зонд-5 и -6» совершили облет и фотографирование Луны, после чего возвратились на Землю и доставили фотоснимки высокого разрешения. Очередной аппарат «Зонд-7» был запущен в 1967 г., а «Зонд-8» в 1970 г. Однако эти запуски совершены уже после осуществления мягкой посадки на Луну автоматических лунных станций и проведения первых прямых исследований лунных грунтов. То же относится к американским аппаратам «Лунар-Орбитер», на которых установлена усовершенствованная фототелевизионная техника и в результате получено разрешение на снимках до 1 м.

Для получения данных о грунтах Луны в период, предшествующий посадке на ее поверхность автоматических лунных станций, наибольшее значение имела информация, доставленная космическими аппаратами «Луна-3», «Зонд-3» и «Рейнджер-7, -8, -9», краткие сведения о которых приводятся ниже.

Целью полета станции «Луна-3» было фотографирование невидимой с Земли обратной стороны Луны и продолжение ранее начатых исследований космического пространства. Фототелевизионная система аппарата обеспечивала автоматическое фотографирование, обработку пленки и ее подготовку для передачи изображения на Землю.

Траектория полета станции в момент начала съемки была выбрана так, чтобы получить изображения возможно большей части невидимого с Земли лунного полушария, а также захватить некоторые детали видимого полушария для привязки. С помощью телевизионной аппаратуры, установленной на борту «Луны-3», впервые осуществлялась передача изображений из космоса на расстоянии до 470 000 км. Фототелевизионный способ получения и передачи изображений оказался очень эффективным и впоследствии применялся для фотографического исследования Луны на советских аппаратах «Зонд-3» и «Луна-12», а также на американских аппаратах «Рейнджер» и «Лунар-Орбитер».

Фотографическое исследование Луны было продолжено с помощью космического аппарата «Зонд-3», который был запущен 18 июля 1965 г.

20 июля 1965 г. проведено фотографирование Луны. В момент начала фотографирования аппарат находился на расстоянии 11 570 км от поверхности Луны над видимой ее стороной. Постепенно приближаясь к ее поверхности до 9220 км, он перешел на невидимую сторону, а затем, удаляясь от Луны, закончил фотографирование на расстоянии 9960 км.

Методика фотографирования применялась в основном та же, что при фотографировании на «Луна-3», но телевизионная техника была усовершенствована так, что полученные снимки по своему качеству и детальности не уступали фотографиям видимой части поверхности Луны, полученным в наземных обсерваториях на больших телескопах. Кроме того, меньшие размеры неизученной территории, подлежащей фотографированию, позволили выбрать время съемок, обеспечивающее более благоприятные условия освещения, при невысоком положении Солнца над горизонтом, когда тени выделяли неровности рельефа. При этом каждый участок был сфотографирован под различными углами вследствие значительного перекрытия кадров. Получено 25 снимков, охватывающих 35% площади обратной стороны Луны, которые практически завершили первый ее глобальный обзор. Необследованными остались небольшие области вблизи полюсов Луны, общая площадь которых не превышала 5% от площади всей лунной поверхности.

Если на снимках, полученных с «Луны-3», были отмечены объекты, имеющие в поперечнике не менее 50 км, то на снимках с «Зонда-3» минимальные размеры различаемых кратеров сократились до 5 км.

На основании материалов, полученных аппаратами «Луна-3» и «Зонд-3», вошедших в «Атлас обратной стороны Луны» [27], а также современных фотографических атласов видимой стороны Луны, оригинальных негативов, полученных на отечественных и зарубежных обсерваториях, были составлены полный глобус Луны в масштабе 1 : 10 000 000 и полная карта Луны, состоящая

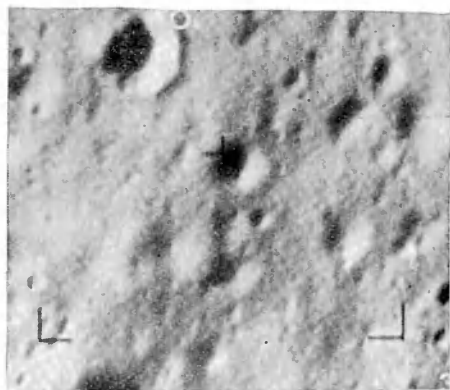
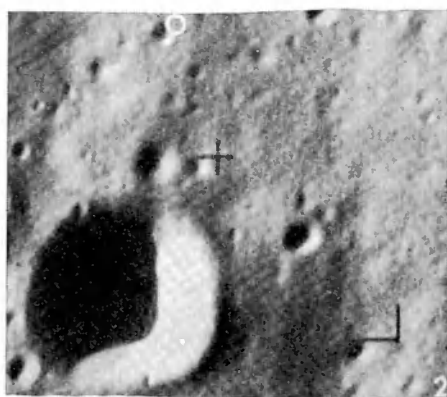
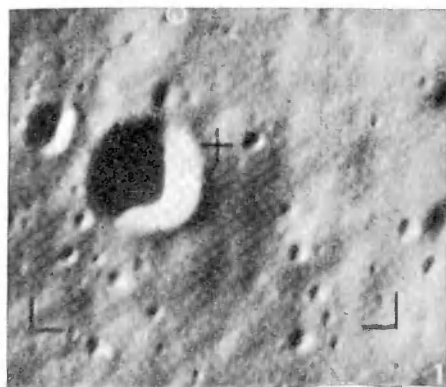


Рис. 2.1. Снимки лунной поверхности, полученные аппаратом «Рейнджер»

1 — с высоты 1000 м; 2 — 600 м; 3 — 300 м

из карты в масштабе 1 : 5 000 000 в произвольной цилиндрической проекции с охватом территории до широты $\pm 60^\circ$ и полярных областей в масштабе 1 : 10 000 000 в азимутальной проекции в области широт выше $\pm 50^\circ$. Кроме того, составлена фотокарта видимой стороны Луны в масштабе 1 : 5 000 000.

С точки зрения грунтоведения фотосъемки, осуществленные аппаратами «Луна-3» и «Зонд-3», имели большое значение, ибо они показали с достоверностью отсутствие на обратной стороне Луны каких-либо природных образований, принципиально отличных от тех, которые присутствуют на видимом полушарии. Никаких указаний на то, что грунты невидимого полушария резко отличаются от грунтов горных районов видимой стороны Луны, получено не было. Измерения в инфракрасных и ультрафиолетовых лучах, проведенные на «Зонде-3», показали, что характерные размеры микроструктурных образований лунного грунта ~ 50 мкм. Неоднородность их характеризуется двухмодовым распределением с модами ~ 5 и ~ 50 мкм [48].

Основной задачей запусков американских аппаратов серии «Рейнджер» было получение изображений лунной поверхности крупным планом в течение последних минут перед падением аппарата на поверхность Луны.

Первые полеты были отработочными, и лишь аппараты «Рейнджер-7—9» дали в 1964—1965 гг. крупномасштабные изображения лунной поверхности.

Передача снимков по двум каналам телевидения начиналась с расстояния нескольких сотен километров до Луны и заканчивалась непосредственно перед ударом аппарата о лунную поверхность (рис. 2.1). Быстрый цикл работы второго канала позволял передать 12 изображений в период, непосредственно предшествующий падению аппарата на грунт. На последних снимках с «Рейнджеров» можно различить детали поверхности Луны размерами 0,5—1,0 м. Анализ снимков, полученных аппаратами «Рейнджер», позволил составить представление о строении лунной поверхности, до сих пор лежавшей за пределами разрешающей способности ранее применявшейся аппаратуры. Однако единодушия в оценке полученных результатов достигнуто не было. Руководитель эксперимента Г. П. Койпер считал, что поверхность лунных морей сложена твердой лавой, эродированной ударами космических частиц, и покрыта слоем колкого и хрупкого материала, напоминающего сухой снег [22]. Вторичные кратеры образованы, по его мнению, глыбами, выброшенными при первоначальных ударах. Обломочный пылевой слой при этом не возникает.

Г. Юри и Б. Ю. Левин обнаружили на снимках признаки вулканической деятельности. Т. Голд нашел в них подтверждения своей пылевой гипотезе. По мнению Е. М. Шумэйкера, поверхность напоминает сырой песок. Того же мнения придерживался Д. Лумис, который толщину зернистого материала определил в 9—12 км (цит. по [11]).

В результате фотосъемок с космических аппаратов были уточнены детали строения кратеров и многих других элементов лунной поверхности. Дешифровка снимков, скомбинированная с лабораторными опытами на моделях, позволила получить ряд новых данных, характеризующих грунты лунной поверхности.

2.3. Определение состава лунных пород с помощью искусственных спутников Луны

Определение химического состава лунных пород с помощью искусственных спутников Луны относится к числу крупнейших достижений советской космохимии — новой науки, основы которой были созданы в СССР группой советских ученых под руководством академика А. П. Виноградова.

31 марта 1966 г. в сторону Луны был запущен аппарат «Луна-10», на котором были установлены многоканальный сцинтилляционный гамма-спектрометр, измерявший спектральный состав гамма-излучения лунной поверхности в диапазоне от 0,3 до 3,0 МэВ, аппаратура для регистрации инфракрасного излу-

чения Луны и ряд других научных приборов. 24 августа 1966 г. был запущен новый спутник Луны «Луна-11», на котором в числе прочих исследований проводились измерения гамма- и рентгеновского излучений лунной поверхности. 22 октября 1966 г. был совершен запуск искусственного спутника Луны «Луна-12», на котором были продолжены исследования, начатые на «Луне-10» и «Луне-11», а также получены высококачественные снимки лунной поверхности, позволившие различать кратеры диаметром 15—25 м.

Анализ результатов этих экспериментов дан в работах А. П. Виноградова и Ю. А. Суркова [33, 47]. Для нас наибольший интерес представляют результаты измерения гамма- и рентгеновского излучений Луны. Собственное гамма-излучение Луны связано с присутствием в лунных породах естественных радиоактивных элементов — тория, урана, продуктов их распада и радиоактивного изотопа калия ^{40}K . К этому излучению присоединяется наведенное гамма-излучение, поскольку на поверхность Луны непосредственно воздействуют космические лучи, которые возбуждают гамма-излучение лунных пород. В породах, содержащих мало естественных радиоактивных элементов и изотопов, такое наведенное излучение может быть более интенсивным, чем собственное излучение пород. Однако наведенное гамма-излучение само является характеристикой химического состава излучающей породы, так как при взаимодействии космических лучей с веществом образуются радиоактивные изотопы, типы и количество которых зависят от того, с какими именно элементами взаимодействуют космические лучи. Спектр наведенного гамма-излучения поэтому отображает химический состав облучаемых пород. Считают, что полученные данные относятся к верхнему слою толщиной около 25 см, поскольку излучение из более глубоких слоев поглощается этим слоем. Специальные лабораторные эксперименты позволили определить эти спектры для разных веществ и дать основу для расшифровки результатов исследования гамма-излучения Луны. За время работы станции «Луна-10» было проведено 40 измерений радиоактивности поверхности морей и материков на видимой и невидимой с Земли сторонах Луны.

На рис. 2.2 представлен спектр гамма-излучения лунных пород, полученный аппаратом «Луна-10» [47]. Он не похож на спектры гамма-излучения земных пород, которые определяются только распадом урана, тория, калия и их дочерних элементов. Лунный спектр имеет более пологий спад, чем земной, так как он содержит большую долю гамма-излучения, вызванного воздействием космических лучей, в котором много квантов с энергией выше 1,5 МэВ (кривая 1).

Там же нанесены спектр наведенного гамма-излучения (кривая 2) и спектр гамма-излучения естественных радиоактивных элементов, содержащихся в лунных породах (кривая 3). Как

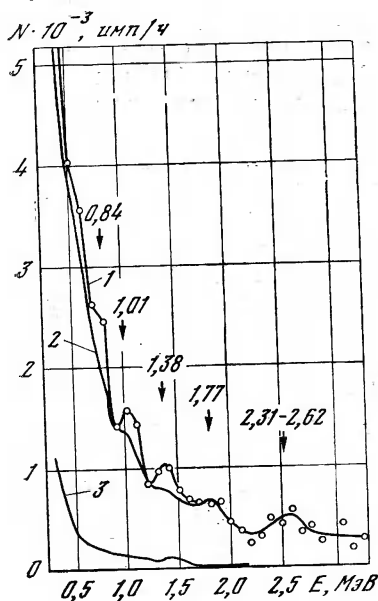


Рис. 2.2. Зависимость между энергией и интенсивностью излучения лунных пород по данным «Луны-10»

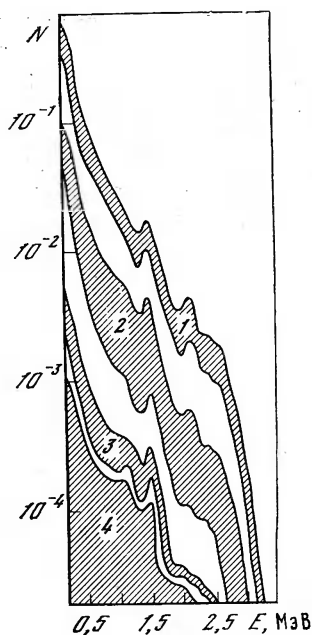


Рис. 2.3. Зависимость между энергией гамма-лучей и интенсивностью излучения земных пород и каменных метеоритов (хондритов)

1 — кислые породы; 2 — основные; 3 — хондриты; 4 — ультраосновные. N — скорость счета в $\text{имп}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot 100 \text{ кэВ})$

видно, не менее 90% всего излучения обусловлено воздействием космических лучей.

Гамма-спектрометр «Луны-10» тарировался на различных земных породах: гранитах, базальтах, дунитах и каменных метеоритах — хондритах. На рис. 2.3 представлены калибровочные спектры, полученные в этих лабораторных опытах. Если наложить кривую 3 рис. 2.2 на калибровочный график рис. 2.3, то окажется, что количество радиоактивных элементов в лунных породах соответствует их содержанию в земных породах основного или ультраосновного состава в зависимости от того, в каком районе проводились измерения. Пород с высоким содержанием радиоактивных элементов, например гранитов на Луне, обнаружено не было.

Средняя интенсивность гамма-излучения радиоактивных элементов над лунными морями оказалась близкой к той, которая наблюдалась бы над земными базальтовыми породами. Над

лунными материками гамма-излучение естественных радиоактивных элементов практически отсутствует, как это и должно быть над ультраосновными породами.

В результате работы аппарата «Луна-10» сделан вывод о том, что поверхность лунных морей состоит из базальтовых пород, а материков, по-видимому, из хондритовых пород, не подвергавшихся расплавлению [33]. Обнаружение базальтовых пород на Луне аппаратом «Луна-10» подтвердилось результатами последующих исследований, проведенных аппаратом «Луна-12» и автоматическими лунными станциями «Сервейер».

С помощью специальной чувствительной аппаратуры, установленной на аппарате «Луна-10», было обнаружено рентгеновское излучение Луны. Оно имеет, по-видимому, рентгенофлуоресцентную природу и возникает в поверхностном слое освещенной части Луны под влиянием рентгеновского излучения Солнца. Атомы кремния, алюминия и магния, входящие в состав лунных пород, поглощают рентгеновское излучение Солнца и переизлучают его в своих характеристических линиях, имеющих соответственно длины волн 7, 8 и 10 Å.

Аппаратура, установленная на «Луна-12», подтвердила эти данные о рентгеновской флуоресценции поверхностных слоев Луны под действием рентгеновского излучения Солнца. Поток излучения от Луны в области длин волн от 8 до 14 Å хорошо коррелирует с величиной потока рентгеновского излучения Солнца. Результаты измерений согласуются с теоретической оценкой его природы в предположении о том, что поверхность Луны образуют базальтовые породы [33, 36].

Значительно позднее на орбитальных модулях лунных кораблей «Аполлон» была установлена аппаратура для регистрации гамма-излучения поверхности Луны. При полетах вокруг Луны эта аппаратура регистрировала излучение различных участков ее поверхности. Интенсивность излучения связана с присутствием определенных элементов в поверхностном покрове. Наибольшая интенсивность наблюдается над лунными морями и указывает на повышенные концентрации железа и титана [47].

Там же показаны аналогичные результаты определения возраста различных пород на поверхности Луны, вычисленного по крутизне склонов кратеров и эрозии поверхности корреляцией этих данных с результатами определения возраста образцов, отобранных на поверхности Луны. Возраст оценивается от 3 до 3,85 млрд. лет.

2.4. Оценка глубины рыхлого слоя на поверхности Луны методом моделирования лунных кратеров

На снимках лунной поверхности, полученных с Земли, большие кратеры имеют, как правило, резкие очертания. При анализе снимков, сделанных аппаратом «Рейнджер-7», оказалось, что многие кратеры малых и средних размеров, видимые на этих фотографиях, имеют смягченные, размытые очертания, уменьшенное отношение глубины к диаметру, нерезкие контуры деталей рельефа (рис. 2.4). Было сделано предположение, что такое смягчение рельефа малых кратеров могло произойти в результате частичной засыпки их постепенно нарастающим слоем зернистого материала и пыли, общая толщина которого была недостаточной для такого же смягчения рельефа больших кратеров, видимых с Земли.

Л. Д. Джаффе [40—42] использовал эту концепцию для лабораторного моделирования лунных кратеров и процесса их погребения под слоем зернистого материала. Модели кратеров создавались путем вдавливания сферического или конического штампа в сухой кварцевый песок, насыпанный в лабораторный лоток.

Размеры моделей были следующими (в мм):

Тип кратера	A	B	C
Глубина от верха кольцевого гребня	13,0	18,0	22,0
Высота гребня над прилегающей поверхностью	4,6	6,6	2,8
Внутренний диаметр кольцевого гребня	152	152	173

Полученные кратеры фотографировались под таким же углом и при таком же направлении света, как это было при съемке кратеров на Луне аппаратом «Рейнджер-7». После этого производилась постепенная засыпка кратеров среднезернистым песком сквозь сито. Гранулометрический состав песка был следующим:

Крупность фракции, мм	0,83—0,59	0,59—0,42	0,42—0,30	0,30—0,21	0,21—0,15
Содержание фракции, %	4	55	36	4	1

Время от времени процесс засыпки прерывали и производили повторное фотографирование кратера в разных стадиях засыпки — при разной толщине насыпного слоя.

С увеличением толщины насыпного слоя резкие первоначально очертания исследуемого кратера смягчались, и в конце концов он становился почти неразличимым (рис. 2.5).

После того как были получены эти фотографии и определены соответствующие толщины засыпки, было произведено сравне-

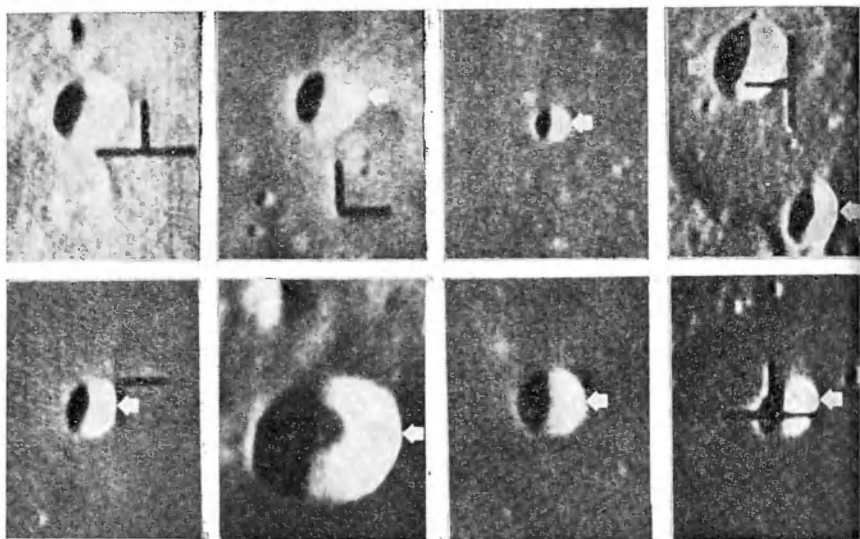


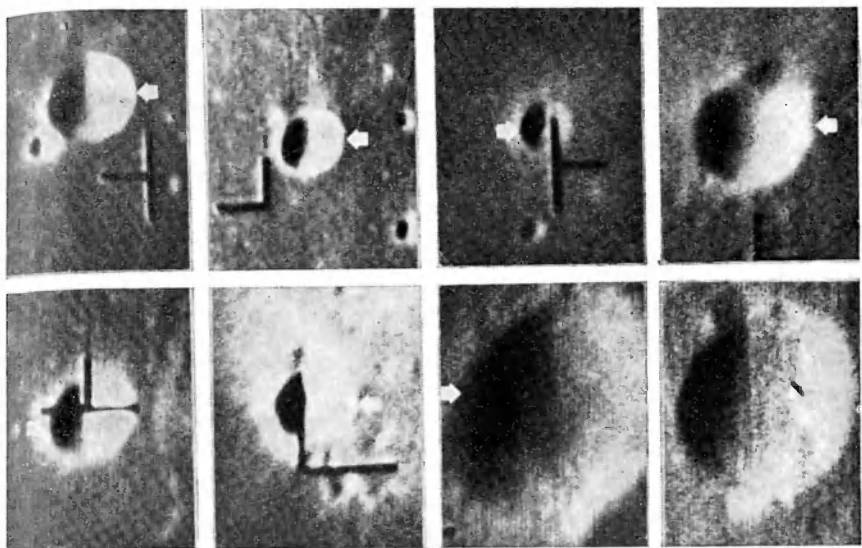
Рис. 2.4. Лунные кратеры различного возраста, имеющие разную резкость очертаний, на снимках с космического аппарата «Рейнджер»

ние снимков моделей со снимками лунных кратеров, полученных аппаратом «Рейнджер-7» в районе Моря Познанного. Сравнение производили два наблюдателя независимо друг от друга. Прежде всего сравнивалась резкость контура кольцевого гребня. Толщина слоя засыпки определялась на поверхности, окружающей кратер, а не в его центре, где она может быть больше, и выражалась в процентах от глубины и от диаметра исходного кратера.

Первая серия сравнений была произведена с 10 снимками лунных кратеров диаметром от 3 до 13 000 м.

После пересчета модельных размеров на истинные размеры лунных кратеров оказалось, что одинаковый эффект смягчения рельефа получается у девяти кратеров при толщине слоя зернистого материала от 3 до 40 м; у десятого кратера, который был 3 м в диаметре, толщина слоя оказалась менее 3 м. В среднем же для изученного района была принята толщина зернистого слоя 5 м.

В дальнейшем такая же работа была проделана с использованием снимков лунных кратеров, сделанных аппаратами «Рейнджер-8» и «Рейнджер-9» в районе Моря Спокойствия и кратера Альфонс. Было выбрано 36 снимков, на каждом из которых были отобраны для изучения по три самых больших кратера. При моделировании в одной серии опытов материал засыпки был совершенно несвязный, а в другой имел сцепление порядка 10 дин/см^2 , или $1 \cdot 10^{-4} \text{ Н/см}^2$ [41, 42]. В описанных опытах не отражено влия-



ние сейсмических и эрозийных процессов, также смягчающих рельеф кратеров.

Опыты показали, что при несвязном насыпном материале у кратеров диаметром 55 м и больше толщина зернистого слоя должна быть равна 5 м, а может быть, и значительно больше. У кратеров диаметром 30 м и менее этот слой тоньше, что указывает на меньший возраст таких кратеров.

При использовании материала, обладающего сцеплением, толщины слоя получились намного большими, и их следует исчислять десятками метров.

2.5. Анализ высоты и крутизны откосов лунных кратеров

Если считать, что кратеры на Луне возникали внезапно в результате вулканического взрыва или удара метеорита, то их откосы должны состоять из зернистого и крупнообломочного материала, лежащего в том виде, как он был выброшен на поверхность, т. е. с уклоном, равным предельно возможному при данных механических свойствах грунта.

На снимках, полученных космическими аппаратами «Рейнджер», кратеры диаметром более 10 м получались с достаточно большой резкостью и детальностью.

Путем анализа этих снимков, используя очертания теней и зная угол, под которым солнечные лучи падали на кратер в момент съемки, можно построить профиль кратера и вычислить угол наклона его откосов.

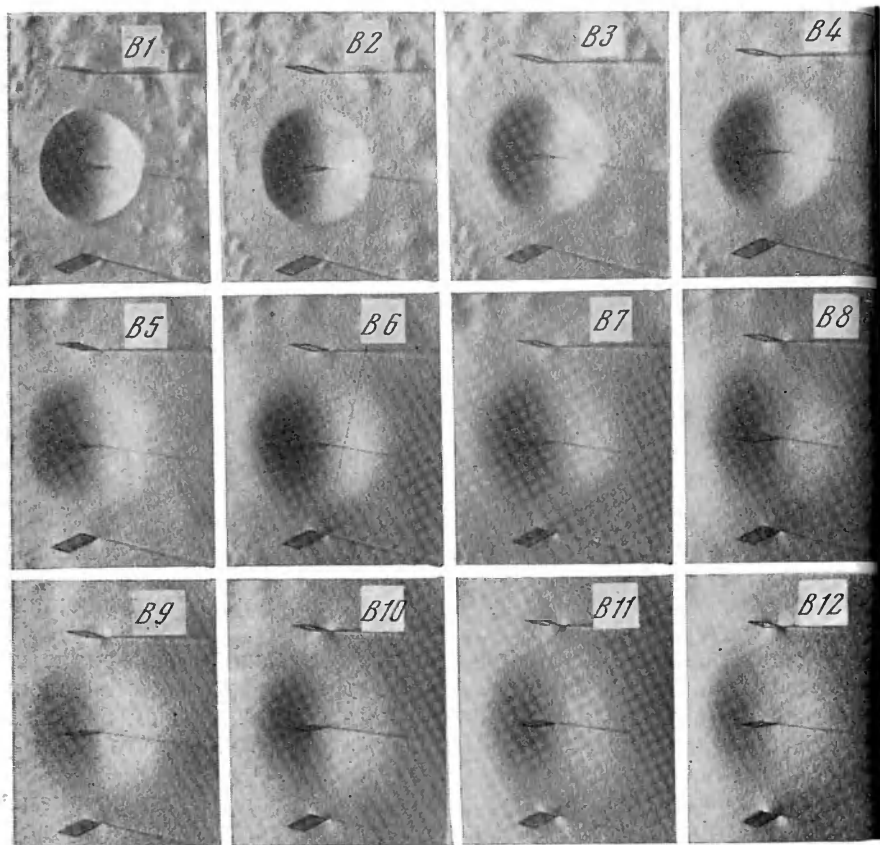
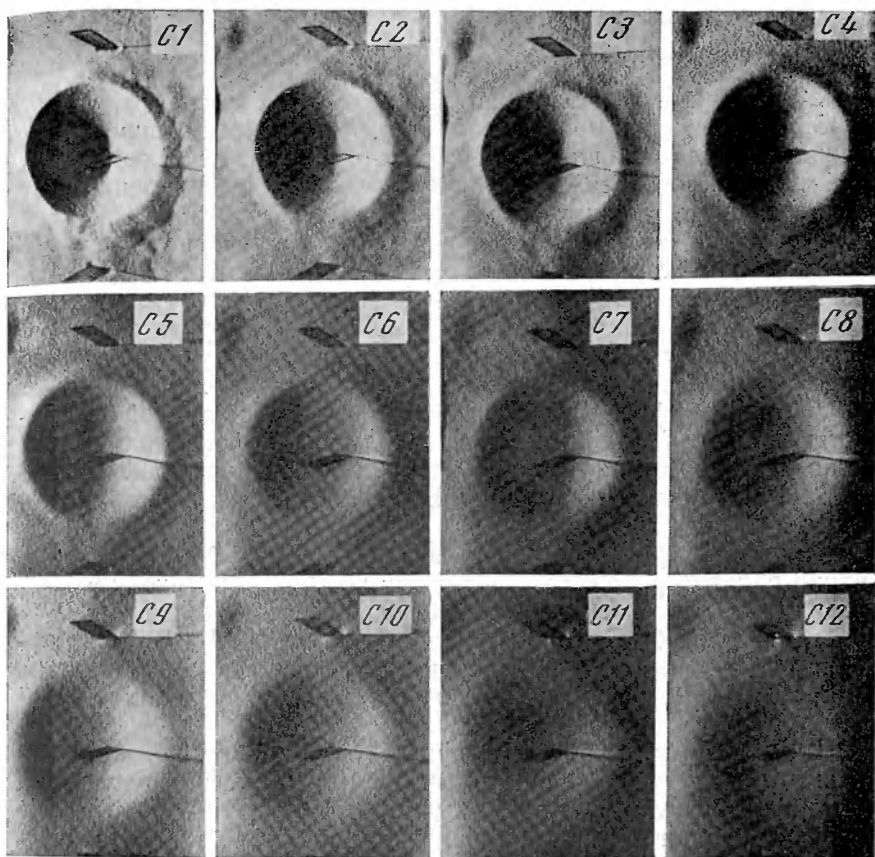


Рис. 2.5. Имитация очертаний лунных кратеров различного возраста в опытах Л. Д. Джаффе посредством засыпки мелкозернистым материалом

В механике грунтов существует ряд способов расчета устойчивости откосов, которые позволяют при заданных механических параметрах грунта — угле внутреннего трения, сцеплении и объемном весе — определить максимально возможную крутизну откоса заданной высоты. Обратным пересчетом по заданной высоте и углу наклона откоса можно найти возможные комбинации угла трения, сцепления и объемного веса, при которых такой откос может существовать. Поскольку при анализе фотоснимков достаточно точные данные можно получить пока только для больших кратеров, а малые кратеры и лунки лежат на пределе разрешающей способности для вычисления механических параметров грунта, уместно применить приближенные приемы. К их числу относятся формулы Терцаги и Скотта [43, 44].



Терцаги рассматривает предельное равновесие откоса из однородного материала, лежащего на однородном основании. Скотт рассматривает откос, лежащий на слое из такого же материала, который имеет ограниченную толщину и подстилается снизу твердым скальным основанием. В обоих случаях предполагается, что разрушение откоса происходит путем образования круглоцилиндрической поверхности скольжения, проходящей через вершину и основание откосов, а при наличии скального основания — касательной к поверхности скалы.

Уравнение Терцаги имеет следующий вид:

$$c/\rho a = H_{\text{крит}}/N,$$

где $H_{\text{крит}}$ — критическая высота откоса, c — сцепление грунта, ρ — плотность грунта, a — ускорение силы тяжести, N — коэффициент, зависящий от угла внутреннего трения φ и угла наклона откоса β .

Уравнение Скотта таково:

$$c/\rho a = z[\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \varphi] \cos^2 \beta,$$

где z — толщина слоя грунта, лежащего поверх скалы.

Задавая различные значения β , φ , N и z , можно определить нижний предел отношения $c/\rho a$. Из этого отношения, задавая ρ и a , можно найти сцепление c , которое вместе с углом трения даст полную характеристику грунта.

Как видно, кроме величин, поддающихся непосредственному измерению по фотоснимкам (высота и угол наклона откоса с точностью не выше $\pm 10\%$), приходится вводить в расчет значительно менее достоверные величины толщины слоя грунта под откосом z и плотности грунта ρ . Поэтому результаты расчета можно рассматривать только как сугубо ориентировочные.

Л. Д. Джаффе [42, 45] провел анализ снимков лунной поверхности в районе Моря Познанного и кратера Альфонс, полученных аппаратами «Рейнджер». Диаметры кратеров колебались от 2,8 до 2800 м, высота откосов — от 0,1 до 460 м, углы наклона откосов — от 9 до 42°.

Плотность грунта была принята Л. Д. Джаффе [45] на основании радиоастрономических данных по В. Д. Кротикову в двух вариантах: для слоев, близких к поверхности, в пределах 0,6—0,7 г/см³ и для более глубоких слоев в пределах 1—3 г/см³. Глубина подстилающего слоя принималась на основании опытов Джаффе и радиоастрономических данных в пределах 0,05—110 м.

В цитируемых работах не приведены промежуточные вычисления, а даны только значения несущей способности грунта $\sigma_{\text{крит}}$, которая зависит от ρ , a , c и φ , вычисленных в двух вариантах. По первому варианту нагрузка распределена вдоль бесконечной полосы шириной $b=10$ см, по второму — вдоль такой же полосы шириной 100 см. Первый вариант дает представление о несущей способности для малых нагружающих площадок, например от обуви космонавта, второй — для значительно больших: опор космических аппаратов, колес лунных транспортных средств. Вычисление несущей способности было выполнено методами теории предельного равновесия. Л. Д. Джаффе использовал формулу Терцаги для местного сдвига и таблицы коэффициентов Скотта [43, 44].

Под несущей способностью в механике грунтов обычно понимают такое среднее давление под нагружающей площадкой, при незначительном превышении которого происходит глубокий провал, сопровождающийся выпиранием масс грунта в стороны (общий сдвиг) или уплотнением непосредственно под площадкой (местный сдвиг). Однако иногда несущую способность определяют как среднее давление, нужное для погружения площадки в грунт на заранее заданную глубину, например на глубину, равную ее ширине. Л. Д. Джаффе провел вычисления для обоих

Таблица 2.3

Несущая способность лунных грунтов, рассчитанная по размерам лунных кратеров

b, см	$\frac{c}{pa}$	Средняя массовая несущая способность $\sigma_{\text{мас}}$, кг/см ² , при $c = 0,01$ Н/см ²	
		при нулевом вдавлении	при вдавлении на глубину, равную ширине нагрузки
10	0,1—0,3	0,01	0,03
100	1,0—3,0	0,10	1,00

случаев. При этом он воспользовался понятием массовой несущей способности $\sigma_{\text{мас}}$, выражающейся в килограммах массы на квадратный сантиметр нагружающей площадки:

$$\sigma_{\text{мас}} = \sigma_{\text{крит}}/a.$$

В результате получены следующие данные (табл. 2.3).

Переходя от массовой несущей способности к весовой, получим для нагрузки, распределенной по полосе шириной 10 см, $\sigma_{\text{крит}} = 0,5$ Н/см², а шириной 100 см $\sigma_{\text{крит}} = 16,2$ Н/см².

Помимо неточности измерений и некоторого произвола в выборе исходных данных, недостаток расчетов состоит еще в том, что совершенно не принимается во внимание сейсмическая активность на Луне, из-за которой откосы кратеров должны с течением времени уползать. Поэтому приведенные выше данные следует считать заниженными. Такого же мнения держится и Л. Д. Джаффе, который для случая глубины вдавливания, равной ширине полосы нагрузки, считает более вероятными следующие значения массовой и весовой несущей способности:

при ширине 10 см $\sigma_{\text{мас}} = 1$ кг/см² и $\sigma_{\text{крит}} = 16,2$ Н/см²,

при ширине 100 см $\sigma_{\text{мас}} = 10$ кг/см² и $\sigma_{\text{крит}} = 162$ Н/см².

2.6. Анализ следов крупных камней на лунной поверхности

На снимках с аппаратов «Лунар-Орбитер» с разрешением 1 м были обнаружены округленные тела неизвестного происхождения, напоминающие собой земные валуны. Два из них найдены в Море Спокойствия, один — в Срединном заливе, один — в Океане Бурь и еще несколько — в других районах. К этим телам крупностью от 5 до 9 м вплотную примыкают продавленные ими в лунном грунте желоба. Фотоизображения крупных камней и желобов подверглись тщательной фотометрической обработке, ко-

торая установила следующее: два валуна имеют блестящую выпуклую поверхность, которая может служить доказательством их происхождения от коренных скальных пород Луны, откуда они были отторгнуты взрывами. Валуны, упавшие на поверхность, катились вниз по склонам. Один из этих склонов удалось точно измерить и установить его средний уклон 21° и длину пути валуна в 400 м. Один из валунов, диаметром 9 м, оставил след шириной в среднем 5 м и глубиной 0,75 м, по которому можно приближенно оценить несущую способность грунта [46].

Сфера диаметром 9 м имеет объем 382 м^3 и площадь контакта с грунтом при хорде сегмента в 5 м, равную $21,2 \text{ м}^2$. Плотность горной породы ρ , из которой состоит валун, может быть принята ориентировочно в пределах от 1,3 до $2,3 \text{ г/см}^3$. При этом несущая способность на контакте валуна с грунтом составит с учетом лунного ускорения силы тяжести $\sigma_{\text{крит}} = 0,4 \div 0,7 \text{ Н/см}^2$.

Таким образом, изучая рельеф и микрорельеф поверхности Луны и особенно следы воздействия на нее различных тел, оказалось возможным получить определенное представление о механических свойствах грунтов, хотя бы в порядке первого приближения. Из приведенных выше данных следует, что самые верхние слои грунта находятся в наиболее рыхлом состоянии и обладают очень малой несущей способностью, измеряемой сотыми долями Н/см^2 и меньше. Более глубокие слои, вовлекаемые в работу при воздействии крупных тел, отличаются более высокой несущей способностью, которая может измеряться единицами Н/см^2 и выше.

Анализ ряда снимков, полученных аппаратами «Лунар-Орбiter», позволил предположить наличие вулканической деятельности на Луне. На снимках можно видеть депрессии, которые, по-видимому, наполнены лавой, а также купола высотой 300—450 м. Эти купола, по предположениям, образовались из застывших вулканических пород.

В заключение следует отметить, что снимки, полученные аппаратами «Рейнджер» и «Лунар-Орбiter», часто интерпретировались различно. Американский астроном Т. Голд говорил, что эти снимки представляют собой «магическое зеркало», в котором каждый ученый видит отражение своей собственной теории о происхождении Луны и ее физических характеристиках [49].

2.7. Сводка результатов измерений косвенными методами

На основе результатов, полученных косвенными методами, к середине 1966 г. сложилось мнение о том, что в пределах лунных морей распространены породы, близкие к земным базальтам, а в горных областях — породы хондритового происхождения, не претерпевшие расплавления. Кислых пород, подобных земным

гранитам, на Луне обнаружено не было. Основные данные были получены для видимой стороны Луны.

Обратная сторона Луны отличается бóльшим количеством горных элементов рельефа и бóльшей плотностью лунных кратеров, но не имеет признаков, которые указывали бы на присутствие горных пород, резко отличных от пород, слагающих горные области видимого полушария Луны.

Поверхность лунных морей слабоволнистая, с уклонами 0,05—0,1. Она усеяна мелкими кратерами и лунками, а также крупными камнями и обломками скальных пород. Материал поверхностного слоя, по всей вероятности, разнотекстурный, рыхлый и состоит из продуктов дробления скальных пород метеоритами или продуктов вулканического извержения. Некоторые ученые допускали возможность залегания на поверхности Луны слоя легкого пенистого материала или слоя тонкой несвязной пыли.

Толщина рыхлого или пенистого слоя лунных морей переменная и может меняться от нескольких миллиметров до многих метров. На поверхности плотность ниже 1 г/см^3 , с глубиной она увеличивается. Под рыхлым слоем лежат твердые породы.

Несущая способность верхнего рыхлого слоя оценивается в пределах от нескольких сотых до десятков Н/см^2 . При наличии несвязной пыли несущая способность близка к нулю. Между зернами рыхлого слоя предполагается сцепление, обусловленное молекулярными силами в местах контакта.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУННЫХ ГРУНТОВ С НЕПОДВИЖНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

3.1. Назначение автоматических станций и районы их деятельности

Основная информация о свойствах лунных грунтов, до доставки их образцов на Землю, добывалась малыми автоматическими станциями, совершавшими посадку в разных районах Луны и проводивших исследования в местах посадки [51, 53—55, 58, 62]. Трудно переоценить значение проделанной ими работы. На основе полученных данных были разработаны посадочные устройства новых тяжелых автоматических станций, которые произвели бурение и отбор проб лунных грунтов и доставили на поверхность Луны луноходы. Те же данные использовались при проектировании самоходных шасси луноходов и посадочных устройств кораблей «Аполлон».

Первую мягкую посадку в Океане Бурь совершила 3 февраля 1966 г. советская станция «Луна-9» [52] и 24 декабря 1966 г. в том же районе станция «Луна-13» [53]. В период со 2 июня 1966 г. по 21 февраля 1968 г. на Луне работали американские автоматические станции «Сервейер-1, -3, -5—7» [62]. Шесть станций совершили посадку в морских областях Луны и одна в горном районе, вблизи от кратера Тихо (табл. 3.1).

Большая разница в рельефе морских и горных районов Луны видна на рис. 3.1. На рис. 3.1, а представлен снимок района посадки «Сервейера-1» на слегка волнистой равнине морского типа внутри затопленного лавой кратера диаметром около 100 км, на рис. 3.1, б снимок района посадки «Сервейера-7» неподалеку от кратера Тихо в горном районе. Оба снимка получены орбитальными аппаратами «Лунар-Орбитер».

Характерной особенностью исследований грунтов, проводившихся автоматическими станциями, является широкое использование данных о взаимодействии станции в целом или ее отдельных элементов с грунтом, о прыжках, перегрузках и колебаниях корпуса при посадке, о глубине вдавливания опор и воздействии газовых струй.

С одной стороны, такая методика является вынужденной, поскольку вес научной аппаратуры строго ограничен и взять все необходимые приборы невозможно. С другой стороны, такие данные, которые получают наблюдением за деформациями грунта под опорами или его эрозией газовой струей, имеют сами по

Таблица 3.1

Районы посадки неподвижных автоматических станций и проведенные ими исследования

Станция	Характеристика района посадки и период работы станции на Луне	Исследования, проведенные станцией
«Луна-9»	Океан Бурь. Плоская равнина морского типа 3.II—6.II 1966 г.	Проверка возможности мягкой посадки на поверхность Луны, телевизионная съемка поверхности грунта
«Луна-13»	Океан Бурь. Плоская равнина морского типа 24.XII—31.XII 1966 г.	Телевизионная съемка, определение плотности и механических свойств грунта специальными приборами
«Сервейер-1»	Юго-западная часть Океана Бурь. Равнина морского типа внутри кратера Фламстед 2.VI 1966—7.I 1967 г.	Телевизионная съемка, измерение усилий и ускорений в посадочном устройстве
«Сервейер-3»	Юго-восточная часть Океана Бурь. Откос кратера диаметром 200 м 20.IV—4.V 1967 г.	То же, рытье траншей, испытания грунтов ковшом манипулятора
«Сервейер-5»	Юго-восточная часть Моря Спокойствия. Верхняя часть откоса кратера размерами 9×12 м 21.IX—17.XII 1967 г.	То же, что «Сервейер-1», радиационно-химический анализ грунта и опыты с магнитами
«Сервейер-6»	Залив Срединный. Равнина морского типа 10.XI—14.XII 1967 г.	То же
«Сервейер-7»	Поле выбросов из кратера Тихо. Холмистый горный район 10.I—21.II 1968 г.	То же, рытье траншей и испытания грунтов ковшом манипулятора

себе большую ценность и их трудно было бы заменить чем-либо еще.

Другая особенность состоит в использовании телекамер с высокой разрешающей способностью, которые позволили получить детальную информацию о природном рельефе и структуре поверхности Луны и оценить гранулометрический состав грунта. С помощью телекамер получены данные о деформациях грунта под действием посадочных устройств и газовых струй и оценена способность грунта к налипанию на детали станций и намагниченные элементы.

Все это отличает методику исследований лунных грунтов от той, которая применяется на Земле, но отнюдь не исключает и применения более привычных методов и приборов, подробное описание которых приводится в следующих разделах главы.

Особые задачи были поставлены перед советскими автоматическими станциями второго поколения: «Луна-16, -20 и -24».

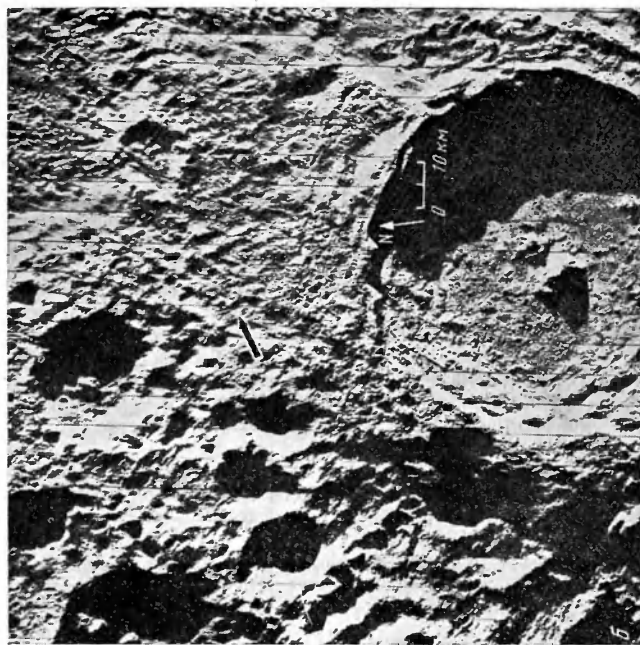
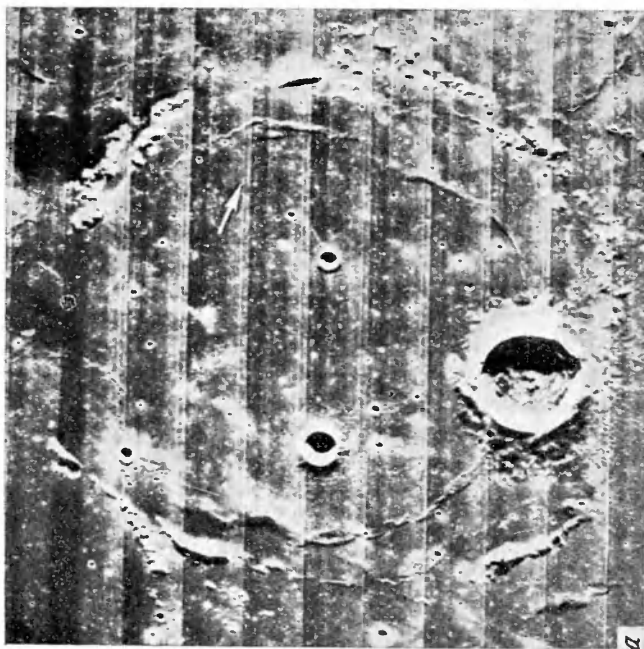


Рис. 3.1. Район посадки «Сервейера-1» — равнина морского типа (а) и район посадки «Сервейера-7» — горный ландшафт (б).

Они опустились в заранее заданных точках лунной поверхности, произвели бурение и отбор проб грунтов и с помощью специальных ракет доставили эти пробы в герметичных контейнерах для изучения в лабораториях на Земле.

Работе этих «лунных геологов» посвящен последний раздел настоящей главы.

3.2. Исследования с помощью автоматических станций «Луна-9» и «Луна-13»

Изучение физико-механических свойств грунтов Луны с помощью станций «Луна-9» и «Луна-13» выполнялось Ю. А. Сурковым, К. П. Флоренским, А. Л. Кемурджианом, В. В. Грозовым, В. В. Михеевым, М. И. Смородиновым и их сотрудниками, труды которых использованы при составлении настоящей главы [51, 53—55]. Авторы книги принимали участие в экспериментах, выполненных с помощью станции «Луна-13» [53—55].

Станция «Луна-9» явилась первым разведчиком свойств лунного грунта, определяющих условия взаимодействия опускающегося аппарата на поверхность Луны.

Поскольку до полета данные о плотности и прочности поверхностного слоя лунного грунта были противоречивы, система мягкой посадки была разработана так, чтобы обеспечить безопасное прилунение как на твердую скальную поверхность, так и на рыхлый дисперсный грунт.

Корпус станции имел форму шара. Его наружный диаметр около 50 см, масса 17 кг. Во время полета к Луне на лунной ракете шар находился внутри мягкой оболочки, которая была образована двумя эластичными мешками, соединенными между собой специальным быстро размыкающимся устройством.

Ракета подлетела к Луне со скоростью 2,6 км/с и затормозилась практически до нуля перед отделением автоматической лунной станции.

Мягкая оболочка АЛС перед посадкой на Луну наполнилась сжатым газом. Оба эластичных мешка раздулись и образовали единую сферическую упругую оболочку. Гигантский мяч упал на грунт с небольшой высоты и, совершив несколько прыжков и прокатившись по уклону, остановился в одном из местных понижений рельефа. После этого устройство, соединяющее амортизирующие мешки, разомкнулось и оба мешка были отброшены в стороны. Корпус АЛС опустился на поверхность грунта. Благодаря округлой форме и низкому положению центра тяжести он принял заранее заданное слегка наклонное положение.

Приблизительно через 4 мин после посадки раскрылись лепестковые и штыревые антенны и были приведены в рабочее состояние приборы для исследования грунта.

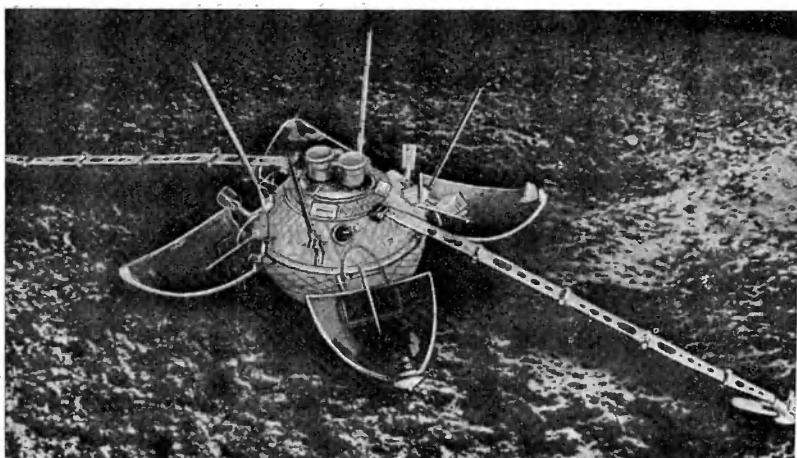


Рис. 3.2. Автоматическая станция «Луна-13»

Выносные механизмы: слева — с грунтомером-пенетрометром, справа — с датчиком радиационного плотнотера

Успех мягкой посадки «Луны-9» доказал, что поверхность Луны достаточно прочна, чтобы выдержать динамическую нагрузку от прилуняющей станции, а затем и длительную статическую нагрузку от контейнера с аппаратурой.

«Луна-9» передала на Землю первые панорамы лунной поверхности, которые позволили оценить мелкие детали рельефа, распределение камней и внешнее строение грунта. Однако на «Луны-9» не было приборов, предназначенных для исследования грунта. Такие приборы были впервые доставлены на Луну советской автоматической станцией «Луна-13».

Система мягкой посадки «Луны-13» была такой же, что и «Луны-9». Внешний вид станции в рабочем положении представлен на рис. 3.2. Снаружи на корпусе укреплены четыре лепестковые антенны, четыре штыревые антенны, два механизма для выноса приборов на поверхность грунта и научная аппаратура. В центральной части корпуса находится головка телевизионной камеры.

Внутри корпуса АЛС установлена жесткая рама с радиоаппаратурой, электронными программно-временными устройствами и приборами автоматики, телеметрической и научной аппаратурой и системой терморегулирования.

Под лепестковыми антеннами во время полета в сложенном виде находятся механизмы выноса приборов для исследования грунтов. Механизмы выполнены в виде складных многозвенников, обеспечивающих вынос приборов на расстояние 1,5 м от

корпуса станции. Раскрытие механизмов производится пружинами кручения, установленными в шарнирах звеньев.

В работах, проведенных станциями «Луна-9» и «Луна-13», исключительно большое значение имели съемки панорам лунной поверхности и передача их на Землю. Для этой цели использовалась фототелевизионная система, имеющая много общего с приборами фототелеграфа, так как она основана на оптико-механическом принципе сканирования изображения с помощью зеркала, качающегося по вертикали и вращающегося в горизонтальной плоскости. Система могла передавать круговую панораму за 100 мин в нормальном и за 20 мин в ускоренном режиме. Угол зрения камеры в вертикальной плоскости составлял 29° и обеспечивал преимущественно передачу изображения поверхности грунта. Высота головки камеры над поверхностью 0,65 м, ближайшее расстояние до грунта по лучу зрения 1,5 м.

Разрешающая способность камеры была 500 элементов в строке, что позволяло различать детали размерами 1,5—2 мм с расстояния 1,5 м. Крупномасштабные изображения поверхности были получены с разрешением в несколько миллиметров, т. е. примерно на шесть порядков выше, чем на снимках, получаемых фотографированием с Земли.

Три двугранных зеркала в поле зрения телекамеры позволяли использовать стереоэффект и определять расстояния до отдельных объектов, видимых на панораме. Кроме того, между первым и вторым сеансами телесвязи камера «Луны-9» неожиданно переместилась на 9 см, что позволило получить стереопары.

Основная цель запуска автоматической лунной станции «Луна-13» состояла в том, чтобы провести первые определения плотности поверхностного слоя лунного грунта и его сопротивления пенетрации с помощью приборов, устанавливаемых на грунт в месте посадки станции. Определения производились с помощью механического грунтомера-пенетromетра, динамографа и радиационного плотномера, работавших независимо друг от друга. При создании этих приборов, их тарировке на моделирующих материалах и разработке методов дешифрирования телеметрической информации, получаемой с Луны, были решены сложные задачи, связанные с предельной миниатюризацией и облегчением аппаратуры, выбором материалов для моделирования лунных грунтов, учетом влияния неровностей на поверхности Луны. Например, грунтомер-пенетromетр развивал усилие, вдавливавшее индентор, которое в 100 раз превышало его вес на Луне, а сложную электронную аппаратуру радиационного плотномера удалось разместить в корпусе объемом всего в 1,5 дм³.

Грунтомер-пенетromетр (рис. 3.3) предназначен для оценки механической прочности грунта. Он состоит из пластмассового корпуса, нижняя часть которого образует кольцевой штамп с наружным диаметром 12,0 и внутренним 7,15 см и титанового индентора с конической нижней частью. Угол заострения конуса

индентора 103° , максимальный диаметр конуса 3,5 см. Индентор может быть выдвинут из корпуса вниз на расстояние до 5,0 см. Его перемещение относительно корпуса измеряется потенциометром, сигнал которого подается на телеметрическую систему.

Верхняя часть индентора служит корпусом реактивного двигателя твердого топлива, сопло которого обращено вверх. Команда на запуск двигателя подается после прилунения станции и опускания прибора на грунт выносным механизмом вслед за снятием нулевого отсчета. Продолжительность действия двигателя в лунных условиях $\sim 0,8$ с, сила тяги 68 Н.

После прекращения работы двигателя индентор остается в том положении, которое было достигнуто им к этому моменту. Очередной опрос телеметрической системой позволяет определить глубину его погружения, а последующие опросы — проследить за изменениями положения индентора с течением времени под действием непредвиденных факторов.

Динамограф был смонтирован внутри корпуса станции на его жесткой раме. Прибор состоял из комплекта акселерометров, ориентированных в трех различных направлениях, и электронного блока с выходом на телеметрическую систему. Во время удара при посадке акселерометры регистрировали возникающие ускорения и передавали их на Землю. Величина ускорений при ударе зависит от жесткости грунта, а последняя связана с его плотностью и структурой. Таким образом, по сигналам динамо-

графа можно судить о механических свойствах грунта, опираясь на результаты предварительных тарировочных испытаний, проведенных на материалах различной жесткости.

Радиационный плотномер предназначен для определения плотности верхнего слоя лунного грунта толщиной до 15 см. Он состоит из датчика (рис. 3.4), укрепленного на выносном механизме и прикладываемого непосредственно к поверхности Луны, и электронного блока, обрабатывающего информацию от датчика и передающего ее телеметрической системе, который установлен внутри корпуса станции.

В датчике помещен ра-

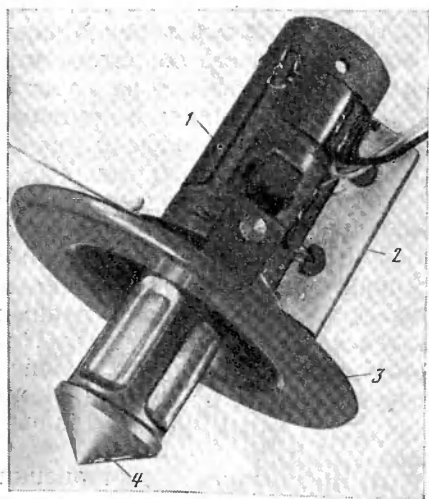


Рис. 3.3. Грунтомер-пенетромтр

1 — корпус; 2 — потенциометр; 3 — кольцевой штамп; 4 — индентор

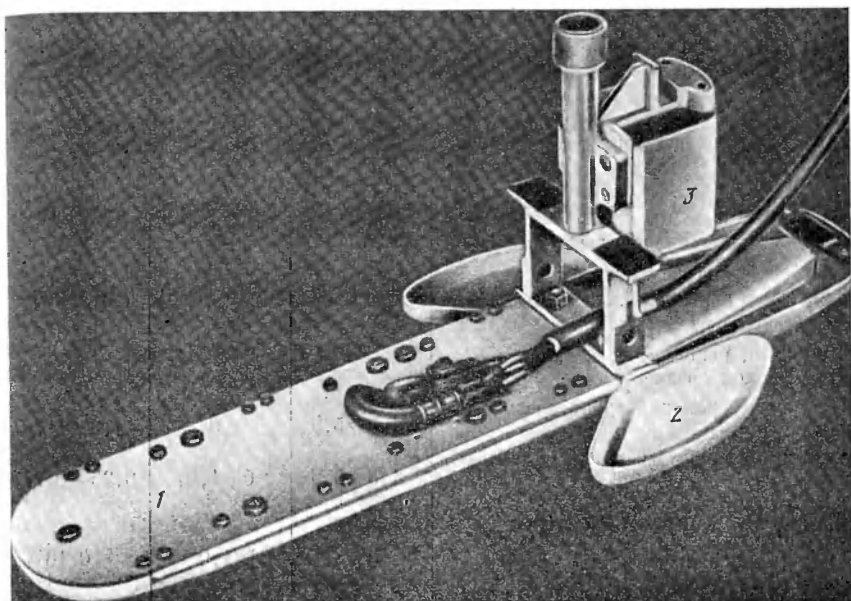


Рис. 3.4. Датчик радиационного плотномера

1 — корпус; 2 — боковые сегменты; 3 — надстройка

диоактивный изотоп цезий-137 активностью в 1 мг-экв. радия, свинцовый экран и три группы гамма-счетчиков. Принцип действия плотномера следующий: гамма-кванты, излучаемые изотопом, взаимодействуют с грунтом, на поверхности которого установлен датчик. Часть из них поглощается грунтом, а другая после многократного рассеяния возвращается к датчику и регистрируется счетчиками. Зависимость между интенсивностью зарегистрированного рассеянного излучения и плотностью грунта при данной схеме измерения изображается параболической кривой, обращенной выпуклостью вверх и имеющей максимум при плотности $1,5 \text{ г/см}^3$. Восходящая ветвь кривой относится к материалам с плотностью от 0,1 до 1,5, а нисходящая — от 1,5 до $3,0 \text{ г/см}^3$.

Поэтому любому показанию счетчиков отвечают два значения плотности — меньше и больше $1,5 \text{ г/см}^3$. Для окончательного выбора необходимо использовать показания грунтомера-пенетromетра, которые также зависят от плотности грунта.

АЛС «Луна-13» проходила разнообразные наземные испытания в условиях, имитирующих посадку на Луну и пребывание в лунных условиях. Для этого были сооружены испытательные стенды, соответствовавшие по своему рельефу и уклонам поверхности тем, которые предполагали встретить в районе прилунения.

Таблица 3.2

Результаты тарировочных испытаний грунтомера-пенетromетра в земных условиях

Природные и искусственные моделирующие материалы	Глубина погружения, см		Плотность моделирующего материала, г/см ³
	индентора	корпуса	
Твердые и плотные скальные породы	0	0	$\geq 2,4$
Тяжелый бетон			
Пенистые и пористые скальные породы	0—1,3	0	0,25—2,0
Связные грунты			
Пенобетон, пеностекло, керамзит на органической связке			
Несвязный зернистый грунт средней плотности	1,3—5,0	0	1,3—1,7
Несвязный зернистый грунт малой плотности	1,3—6,0	0—1,0	0,25—0,77
Дробленый пенобетон, керамзит, аглопорит			
Особо рыхлый, пылевидный грунт	5,0	$> 1,0$	$\leq 0,16$
Вспученный перлитовый песок			

На поверхность укладывались различные материалы, моделирующие лунный грунт, как твердые, так и дисперсные. Испытания проводились путем сбрасывания станции с заданной высоты на поверхность испытательного стенда и регистрации усилий и ускорений в элементах ее конструкции и оборудования. Кроме того, проводились испытания в термовакуумных камерах в широком диапазоне изменения температуры. Этим испытаниям придавалось исключительно серьезное значение, и только благодаря тщательному проведению большого числа опытов удалось выявить вероятные дефекты и неполадки и создать аппарат высокой надежности.

Особое внимание уделялось наземной тарировке всех трех приборов для исследования лунных грунтов. Эти испытания проводились на большом числе различных дисперсных и твердых материалов, имитирующих по своей структуре, плотности и прочности грунты поверхности Луны. Наибольшее число опытов было проделано на зернистых материалах малой плотности.

При тарировке грунтомера-пенетromетра было использовано 14 материалов, начиная от весьма прочной пористой андезитобазальтовой лавы и кончая легким вспученным перлитовым песком, свойства которых отражают предполагаемые свойства лунных грунтов от скальных до пылевидных. В число испытанных материалов, помимо природных, входили также и искусственные — пенобетон, пеностекло, аглопорит и др. (табл. 3.2).

Для выяснения влияния особых условий работы прибора на Луне были проделаны испытания в вакуум-камере, а также исследована зависимость глубины погружения индентора от ускорения силы тяжести. Последняя изучалась на самолете, движущемся по траектории, на которой ускорение, действовавшее на грунт и на прибор, равно лунному. Оказалось, что вследствие уменьшения ускорения силы тяжести глубина погружения индентора в испытываемые грунты в среднем увеличивается на 70%. В вакууме сила тяги двигателя увеличивается против земной на 8,5%. Динамограф был протарирован при сбросах станции на площадку, покрытую среднезернистым кварцевым песком плотностью 1,8 и 1,52 г/см³, а также на толстом мате из поролона. Радиационный плотномер прошел тарировку на тех же материалах, что и грунтомер-пенетrometer, плотность которых изменялась в пределах от 0,5 до 2,26 г/см³.

«Луна-13» опустилась у западного края Океана Бурь в точке с координатами 18°52' с. ш. и 62°03' з. д. в районе кратера Селевк. Это типичная морская равнина с плоским рельефом, расположенная на достаточном удалении от материка (рис. 3.5 и 3.6). Станция попала в кратеровидную депрессию. На панорамах видна четкая линия горизонта, более ровная, чем на снимках «Луны-9».

Поскольку лунные панорамы, снятые станциями «Луна-9» и «Луна-13», показали, что поверхность Луны изобилует многочисленными мелкими неровностями в виде камней и лунок, которые могут исказить показания приборов, рассчитанных на работу на ровной поверхности, был сделан анализ вероятности получения полезной информации от описанных выше приборов [55], в результате которого было признано, что неровности микро-рельефа могут привести к браковке результатов измерений в 30 случаях из 100, или, иными словами, получение достоверных результатов обеспечено на 70%.

На панораме, снятой 24.XII 1966 г. «Луной-13», виден шарнир между первым и вторым звеньями механизма, концевое звено, датчик радиационного плотномера и четкая тень механизма, показывающая, что он опустился нормально.

Обработка панорам, снятых «Луной-9» и «Луной-13», позволила составить достаточно четкое представление о рельефе и построить топографические планы и схемы мест посадки. При этом было выявлено распределение камней и комков, попавших в поле зрения телекамер, по крупности (табл. 3.3).

Поверхность Луны в обоих пунктах посадки можно назвать каменистой россыпью. Из-за условий видимости на дальних планах панорам теряется более мелкий материал и истинные кривые распределения должны измениться в сторону преобладания камней мелких размеров — от 1 до 10 см. Кроме камней, вполне вероятно присутствие комков, возникших в результате слипания между собой мелких частиц. На панорамах «Луны-13» можно

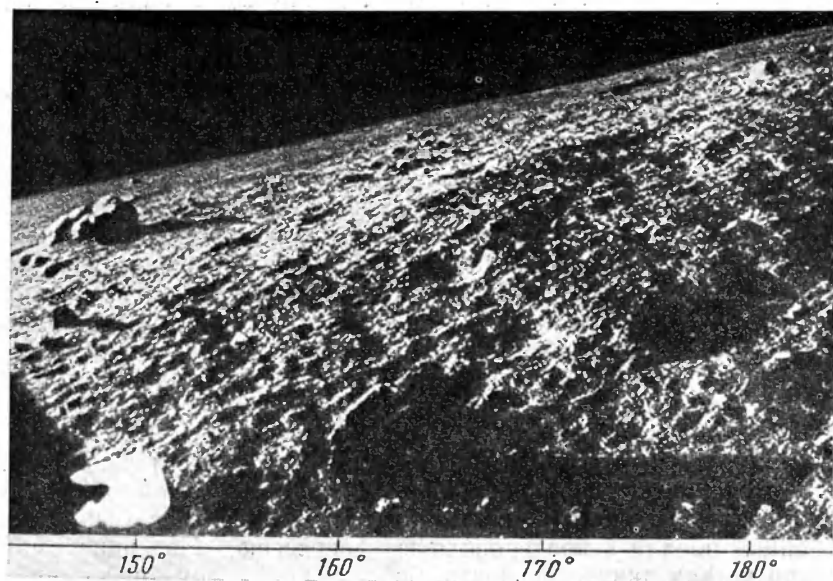


Рис. 3.5. Фрагмент 1 лунной панорамы II, снятой «Луной-13» 26.XII 1966 г.

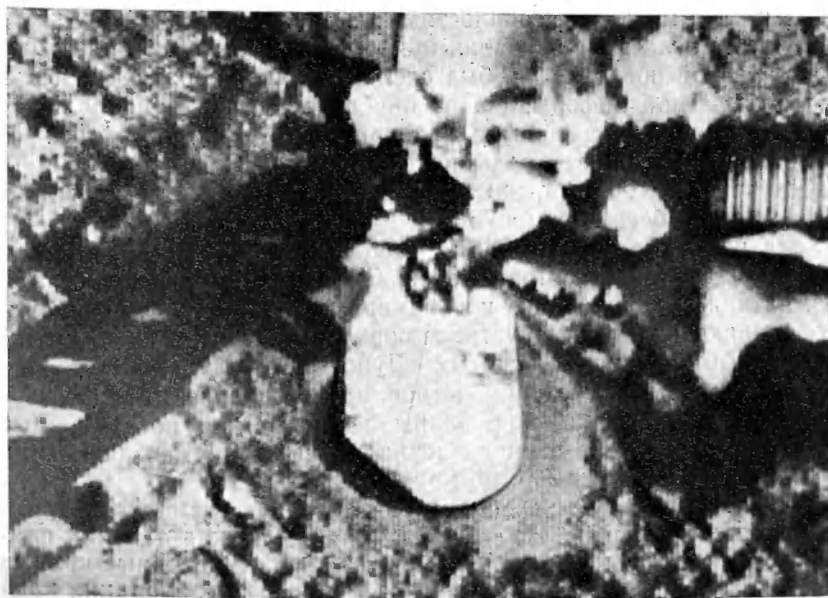


Рис. 3.6. Телевизионное изображение датчика радиационного плотнмера «Луны-13», стоящего на поверхности реголита

Таблица 3.3

Распределение камней и комков по крупности

«Луна-9» (на 50 м ²)		«Луна-13» (на 14,3 м ²)	
Крупность, см	Число камней	Крупность, см	Число камней
2—5	32	1—3	118
5—10	31	3—5	46
10—15	4	5—10	14
15—20	6	10—15	2
20—25	2	15—20	1

было усмотреть комковатые непрочные структуры, преобладающая крупность которых была оценена в 1—2 см.

Поверхность лунного грунта имеет в общем зернистое строение, для которого характерно присутствие мелких зерен, вторичных агрегатов и комочков, состоящих из слипшихся между собой мелких зерен, а также крупных обломков — камней. Последние имеют остроугольную форму и отличаются от комочков слипшегося мелкозернистого материала. Распределение камней по крупности подчиняется закону вида

$$N = KD^\gamma,$$

где N — число камней с диаметром крупнее или больше D на единицу площади, K и γ — параметры кривой распределения. В первом приближении соблюдается правило, по которому в равных логарифмических интервалах крупности заключаются равные массы вещества (в пределах от нескольких миллиметров до десятков сантиметров).

Структура верхнего слоя рыхлая. Материал отличается слабой связностью. Комочки, образованные мелкими зернами, легко деформируются под нагрузкой, что видно по следу, оставленному датчиком радиационного плотнoмера.

Индентор грунтомера пенетрометра погрузился в лунный грунт на 4,5 см. Обработка результатов этого опыта показала, что грунт имеет угол внутреннего трения 32° , сцепление $0,05 \text{ Н/см}^2$ и модуль общей деформации $4,4 \text{ Н/см}^2$. Глубина рыхлого слоя не менее 5 см.

Расшифровка показаний грунтомера-пенетрометра проводилась также с использованием теории механики грунтов, относящейся к случаю вдавливания круглого штампа [55]. Для штампа сложной конфигурации, каким является пенетрометр на станции «Луна-13», готовых решений нет. Однако имеется решение В. Г. Березанцева для плоского штампа [50], под которым сформировалось уплотненное ядро из грунта, образующее конус с углом при вершине, равным 90° . С известным приближением это решение можно использовать в нашем случае, но глубину вдавли-

Таблица 3.4

Сцепление и угол трения лунного грунта по результатам работы грунтомера-пенетрометра аппарата «Луна-13» при $\gamma = 0,00133 \text{ Н/см}^3$

Ф, град	$c, \text{ Н/см}^2$	$N_{\gamma K}$	$N_q K$	$N_c K$
30	0,119	34,6	32,8	55,4
32	0,091	48,8	45,5	71,5
36	0,045	97,2	87,6	120,0

ливания следует уменьшить на высоту конуса, т. е. принять ее равной 3,2 см.

Формула для определения критической нагрузки на штамп, предложенная В. Г. Березанцевым, такова:

$$\sigma_{\text{крит}} = N_{\gamma K} \gamma r + N_{qK} q + N_{cK} c,$$

где r — радиус штампа в см, γ — объемный вес грунта в Н/см^3 , q — пригрузка от веса грунта, лежащего выше подошвы штампа, в Н/см^2 , c — сцепление в Н/см^2 ; $N_{\gamma K}$, N_{qK} , N_{cK} — безразмерные коэффициенты, которые зависят от угла внутреннего трения грунта и принимаются по таблице, составленной В. Г. Березанцевым.

В рассматриваемом случае нагрузка на штамп диаметром $d = 3,5$ см равна 65 Н, откуда

$$\sigma_{\text{крит}} = \frac{65}{(\pi/4) \cdot 3,5^2} = \frac{65}{9,54} = 6,8 \text{ Н/см}^2.$$

Радиус штампа $r = 1,75$ см, объемный вес грунта в лунных условиях $\gamma = 0,8 : 6 = 0,133 \text{ Г/см}^3 = 0,00133 \text{ Н/см}^3$, пригрузка от веса слоя грунта толщиной 3,2 см $q = 0,00133 \cdot 3,2 = 0,0043 \text{ Н/см}^2$.

Сцепление и угол трения неизвестны, и расчет надлежит провести для нескольких возможных комбинаций так, чтобы каждый раз получить $\sigma_{\text{крит}} = 6,8 \text{ Н/см}^2$. Результаты такого расчета представлены в табл. 3.4.

Принимая в качестве среднего и наиболее вероятного значение угла внутреннего трения $\varphi = 32^\circ$, как у аглопоритового песка, мы приходим к величине сцепления $c = 0,09 \text{ Н/см}^2$.

Коэффициент постели, характеризующий сжимаемость грунта, вычисляется по опытам с плоскими штампами как отношение среднего давления p под штампом к глубине вдавливания:

$$K = p/s = 4P/\pi d^2 s.$$

Для штампа сложной формы можно использовать другую форму этого выражения и определить приближенно коэффициент постели как нагрузку P на штамп, деленную на объем лунки V_z :

$$K = P/V_z.$$

Для индентора грунтомера-пенетрометра объем лунки равен объему конуса с $d=3,5$ см, $h=1,3$ см плюс объем цилиндра высотой 3,2 см, а всего $V_{\Sigma}=36,1$ см³, откуда коэффициент постели будет равен

$$K=65/36,1=1,8 \text{ Н/см}^3.$$

Объемный вес $\gamma=0,00133$ Н/см³ на Луне принят в результате определения его на Луне радиационным плотномером.

Плотность верхнего слоя оценивалась по данным трех приборов, причем были получены разные результаты. Глубина погружения пенетрометра в 4,5 см могла быть получена на несвязном песке плотностью 1,52 г/см³ или слабосвязном керамзитовом гравии плотностью 0,77 г/см³. По показаниям динамографа наилучшее совпадение результатов лунного эксперимента с земными испытаниями было получено при использовании несвязного песка плотностью 1,52 г/см³. Показания радиационного плотмера давали два возможных значения плотности: 0,8 и 2,1 г/см³. Таким образом, при расшифровке результатов эксперимента предстояло выбрать одно из них. На основе существовавших в то время представлений о низкой плотности поверхностного слоя Луны предпочтение было отдано величине 0,8 г/см³. По современным данным такая плотность характерна только для самого верхнего горизонта лунного грунта.

3.3. Исследования автоматических станций «Сервейер»

Исследования грунтов по программе «Сервейер» проводились под руководством американских ученых Л. Д. Джаффе, Р. Ф. Скотта, И. К. Митчела и других, труды которых использованы при составлении настоящей главы вместе с официальными отчетами НАСА [57—62]. Основными задачами станций «Сервейер» были исследование механических свойств лунных грунтов, определение гранулометрического и химического состава грунта, изучение взаимодействия посадочных органов с поверхностью и воздействия газовой струи реактивных двигателей на грунт. Кроме того, большое внимание было уделено телевизионным съемкам поверхности Луны в точках посадки, изучению рельефа поверхности и законов распределения малых кратеров, лунок и камней на поверхности. Всего было сделано пять успешных посадок, из которых четыре в морских районах и одна в горном.

В отличие от «Луны-13» ракета-носитель отделялась от аппарата «Сервейер» задолго до его подлета к Луне и направлялась на орбиту, не пересекающуюся с Луной. Вследствие этого торможение и посадка «Сервейера» производились с помощью собственных двигателей.

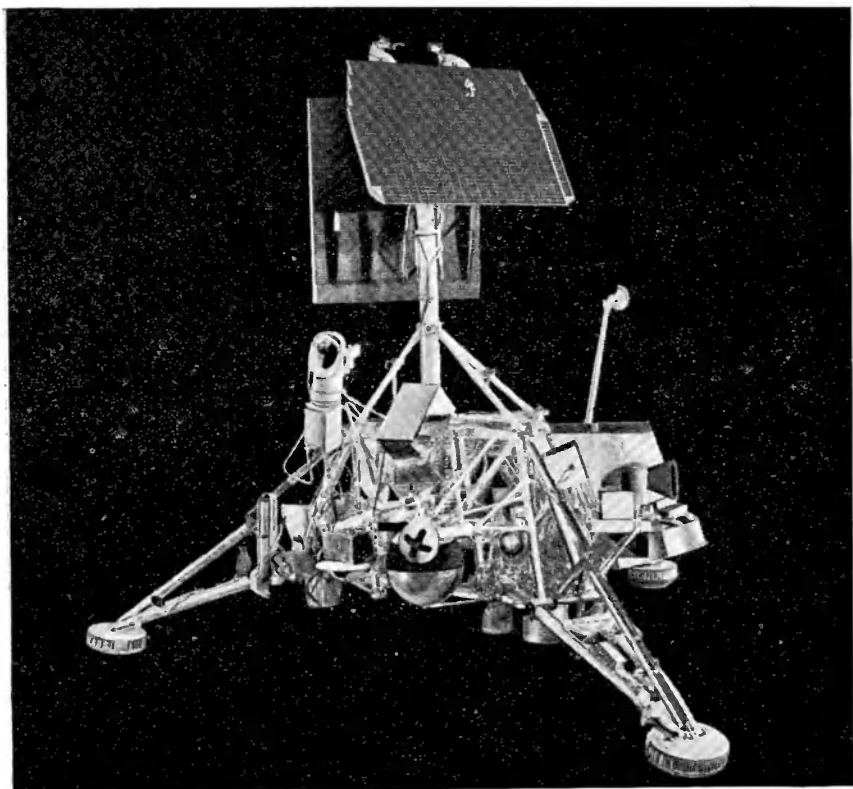


Рис. 3.7. Внешний вид автоматической станции «Сервейер»

Внешний вид станции «Сервейер» представлен на рис. 3.7. Каркас станции выполнен из алюминиевых труб. На каркасе крепятся три ноги посадочного устройства и мачта для батареи солнечных элементов и остроуправленной антенны. Высота аппарата 3 м, диаметр окружности, проходящей через опоры посадочного устройства, 4,27 м. Станция имеет два герметичных контейнера для электронной аппаратуры, двигательную установку, телевизионную камеру, дополнительные антенны, навигационное и научное оборудование.

Масса аппаратов «Сервейер» при посадке на Луну, после израсходования горючего и сброса части оборудования, была от 279 до 286 кг. С учетом лунной гравитации вес станции составлял на Луне в среднем 460 Н и на каждую из трех опор приходилось около 153 Н статической нагрузки. В момент прилу- нения динамическая нагрузка была много больше.

Главный тормозной двигатель, расположенный в его центральной части, работал на твердом топливе. Верньерные дви-

гатели жидкостные. Они расположены вокруг тормозного двигателя с трех сторон через 120° . Один из них имел шарнирную подвеску. Кроме того, на каждой стойке посадочного устройства было установлено по два управляющих реактивных сопла, работающих на сжатом азоте.

Система управления полетом имела среди других приборов также несколько радиолокаторов, служащих для определения расстояния до поверхности Луны. Радиолокационный альтиметр давал сигнал для включения тормозного двигателя, второй лока-тор управлял верньерными двигателями с помощью бортовой вычислительной машины.

Тормозной двигатель снижал скорость станции с 2,68 до 0,16—0,08 км/с. Он прекращал работу на высоте около 10 км, после чего сбрасывался. Верньерные двигатели продолжали работать вплоть до высоты порядка 4,2 м. В этот момент скорость спуска не должна была превышать 1,5 м/с. Затем станция в течение 2 с падала свободно и ударялась о поверхность с номинальной скоростью около 4 м/с.

После посадки производились прием телеметрической информации о состоянии отдельных систем и узлов и первая серия телевизионной передачи с разверткой на 200 строк, после чего панель с солнечными элементами наводилась на Солнце. Вслед за этим начиналась телепередача на Землю с разверткой 600 строк.

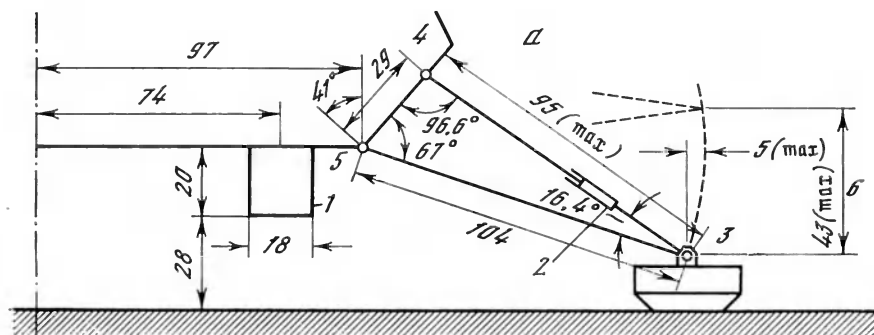
Энергетическая установка включала в себя солнечные элементы, а также основную и вспомогательную химические батареи.

Посадочное устройство имело три ноги, которые разворачивались после вывода станции на трассу полета к Луне. Ноги имели амортизационные устройства самолетного типа. По концам ног шарнирно подвешены тарельчатые опоры, сделанные из алюминиевых сот. К нижней части каркаса станции крепились, кроме того, цилиндрические амортизационные блоки из алюминиевых сот, предназначенные для смягчения удара станции о грунт в момент наибольшего прогиба основных ног (рис. 3.8).

Три ноги расположены в плане через 120° и прикреплены к каркасу шарнирами. Все устройство рассчитано на соударение с грунтом при скорости до 6 м/с и боковой составляющей до 2,3 м/с на склоне крутизной до 15° . Тарельчатые опоры круглой формы имеют сверху диаметр 30,5 см, а внизу суживаются до 20,3 см. Амортизационные блоки имеют диаметр 18 см и высоту 20 см (рис. 3.9).

Тарельчатые опоры и амортизационные блоки сминаются при следующих вертикальных давлениях (в Н/см²) в их подошвах:

У амортизационного блока	28
У нижней части опоры	7
У верхней части опоры	14



1 — амортизационный блок; 2 — амортизатор с ходом в 11 см; 3—5 — шарниры; 6 — максимальное отклонение 43 см; 7 — плита толщиной 1,3 см; 8 — соты прочностью 14 Н/см²; 9 — соты прочностью 7 Н/см²
Все размеры даны в см

Рис. 3.8. Кинематическая схема одной из ног «Сервейера» (а) и схема опоры (б)

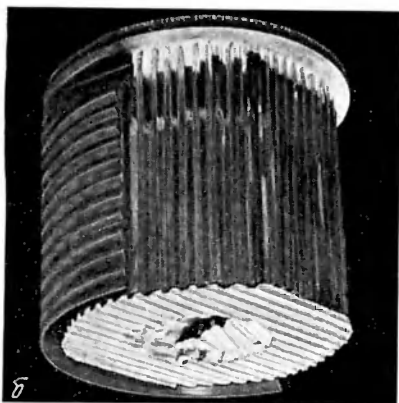
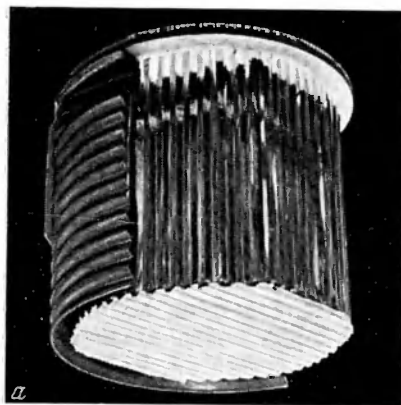


Рис. 3.9. Амортизационный блок из алюминиевых сот прочностью 28 Н/см²

а — до удара о грунт; б — после удара

Часть цилиндрической наружной обшивки из гофрированного алюминия снята для наглядности

В центральной части каждого амортизационного блока имеется вертикальная цилиндрическая полость диаметром 8 см. Снизу блок закрыт гофрированным алюминиевым листом толщиной 0,025 мм. При давлении 2,4 Н/см² средняя часть листа, находящаяся под цилиндрической, начинает прогибаться, а при 2,8 Н/см² полностью продавливается. На рис. 3.9 представлен амортизационный блок до и после испытания вертикальной нагрузкой. На снимках видна также частично удаленная для обнажения сот внешняя термоизоляция в виде гофрированной цилиндрической оболочки.

На рис. 3.10 показана одна из тарельчатых опор. Нижняя часть ее покрыта тонким алюминиевым листом. При ударе о грунт этот лист деформируется так, что становится виден вафельный рисунок, образованный сечением алюминиевых сот.

В элементах конструкции посадочного устройства и на каркасе аппарата были установлены тензометрические датчики и акселерометры, которые измеряли напряжения и ускорения, возникающие в процессе соударения с поверхностью грунта и передавали их по телеметрической системе на Землю. По этим данным впоследствии восстанавливалась траектория движения и определялись нагрузки на опоры, а также записывались собственные колебания станции, продолжавшиеся в течение нескольких секунд после прилунения. В нижней части траектории прилунения «Сервейера-3» не были своевременно выключены верньерные двигатели, и аппарат совершил три прыжка. В ходе экспериментов со станцией «Сервейер-6» прыжок спустя некоторое время после прилунения был вызван преднамеренным включением верньерных двигателей. У станций «Сервейер-1, -5, -7» прилунение проходило нормально.

На рис. 3.11 в качестве примера показаны изменения усилий в амортизационных стойках станции «Сервейер-6», которые по своей величине были самыми большими во всех экспериментах. Хорошо виден первоначальный пик перегрузки при первом контакте с грунтом и последующие затухающие колебания системы. Такие осциллограммы служили одним из важнейших источников информации для оценки механических свойств грунтов в точках посадки станций «Сервейер».

В табл. 3.5 представлены данные, полученные по показаниям датчиков и фотоснимкам поверхности при посадке и прыжках всех станций «Сервейер». Они имеют большое практическое значение для оценки несущей способности и деформационных свойств поверхностного слоя Луны при посадке тяжелых станций и космических кораблей. Телевизионным съемкам придавалось особое значение. На станциях «Сервейер» были установлены камеры, использующие тот же принцип оптико-механического сканирования, что и камеры АЛС «Луна-9 и -13». Для расширения возможностей съемки телекамеры использовали цветные и поляроидные светофильтры, зеркала для стереосъемок и съемок

в местах, недоступных прямому видению, а также для регистрации запыления. Параметры съемки — направление, фокусное расстояние, резкость, выдержка, экспозиция и тип фильтра — устанавливались по командам с Земли. Допускалась съемка с узким ($6,4^\circ$) или широким ($25,3^\circ$) углом зрения. Развертка изо-

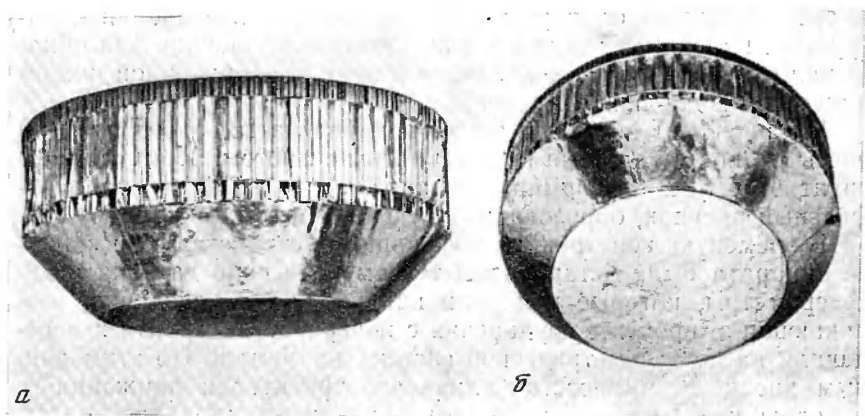


Рис. 3.10. Внешний вид опоры из алюминиевых сот сбоку (а) и снизу (б).

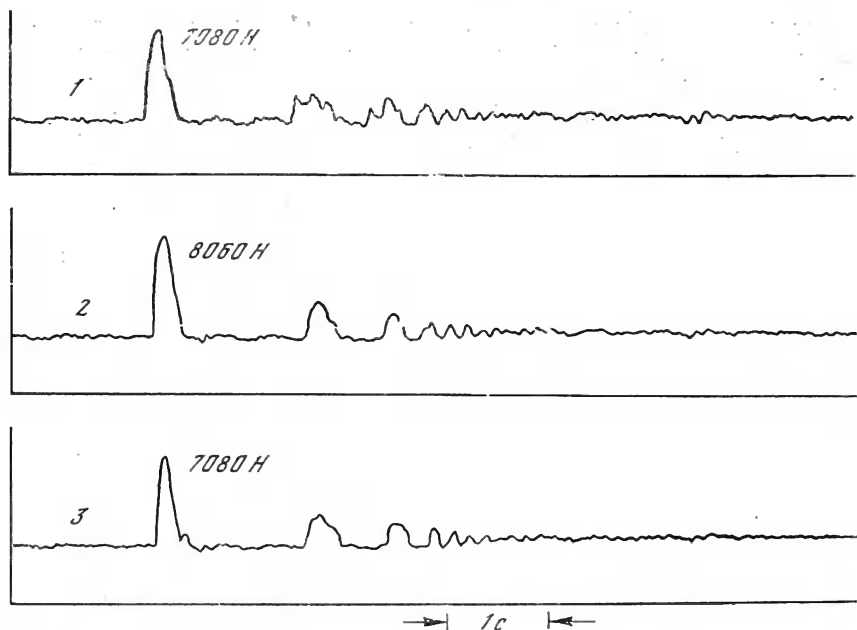


Рис. 3.11. График изменения осевых усилий в амортизаторах трех ног (1—3) «Сервейера-6»

Т а б л и ц а 3.5
Условия прилуновения станций «Сервейер»

Станция	Скорость при посадке, м/с		Уклон поверхности, град	Максимальные осевые нагрузки в амортизаторах, Н			Масса аппарата, кг	Глубина погружения опоры, см	
	вертикальная	горизонтальная		Нога 1	Нога 2	Нога 3		Нога 2	Нога 3
«Сервейер-1»	3,6	0,3	1,0	6 190	7110	6220	294,5	2	2
«Сервейер-3»									
1-й удар	1,8	0,2	11,5	2 970	3060	3680	305,7	—	—
2-й удар	1,4	0,8	14,0	1 420	2800	2350	—	2	2
3-й удар	1,5	0,9	9,2	3 860	2440	4120	299,0	2	4
«Сервейер-5»	4,2	0,3	19,5	5 620	7280	7300	303,7	4±2	4±2
«Сервейер-6»									
Удар при посадке	3,4	0,3	0,9	7 000	8000	7000	300,5	6	3
Удар после прыжка	3,8	0,5	—	14 900	7800	8600	299,8	6	3
«Сервейер-7»	3,8	0,1	3,1	7 330	7800	6450	306,0	4	4
Точность	±0,4	±0,2	±0,5	±5%	±5%	±5%	±0,5	±1	±1

бражения могла быть сделана на 200 или на 600 строк. Разрешающая способность при съемке с расстояния 1,5 м составляла 0,5—1,0 мм.

Станции «Сервейер» передали в общей сложности около 90 тыс. снимков. Многие из них отличались высоким качеством передачи мелких деталей. Сюда относятся, в частности, изображения камней, лежащих на поверхности (рис. 3.12). Высокая разрешающая способность телеснимков обеспечила возможность уверенного определения гранулометрического состава поверхностного слоя в диапазоне крупности частиц и агрегатов от 1 мм до 1 м с последующей экстраполяцией результатов на более мелкие фракции.

В состав основного научного оборудования станций «Сервейер» входили следующие приборы:

— манипулятор с ковшом для разработки грунта и его нагружения;

— альфа-радиометр для радиационно-химического анализа грунта;

— постоянные магниты для оценки магнитных свойств грунта.

Манипуляторы, установленные на станциях «Сервейер-3, -7», представляют собой механизмы, напоминающие экскаватор типа обратной лопаты (рис. 3.13). Рабочим органом служит металли-

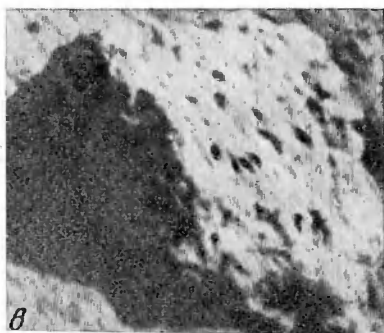
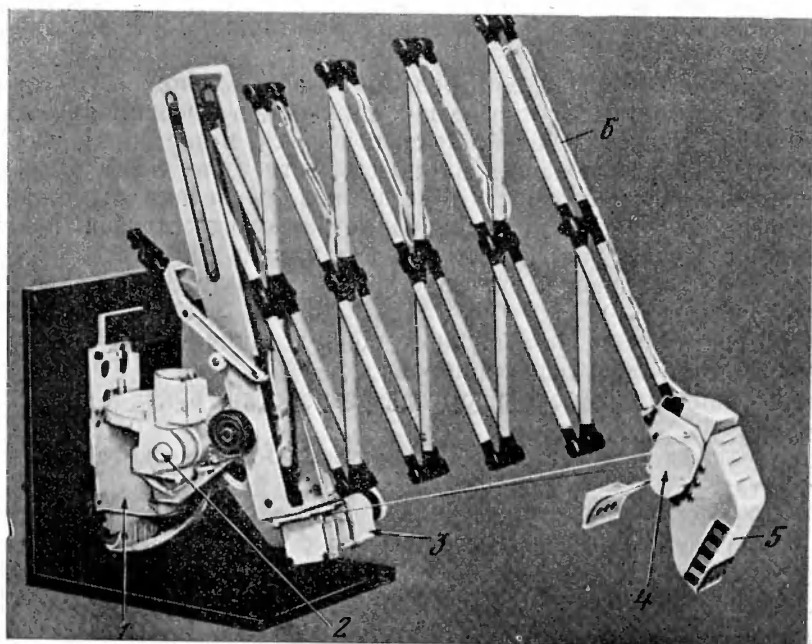


Рис. 3.12. Фотонизображения камней, переданные «Сервейером-3»

а — угловатый камень из плотного материала; *б* — камень с трещинами; *в* — пористый камень

Рис. 3.13. Манипулятор станций «Сервейер-3 и -7»

1 — мотор поворота по азимуту; *2* — мотор подъема; *3* — мотор обратного хода по горизонтали; *4* — мотор ковша; *5* — ковш; *6* — шарнирный механизм



ческий ковш емкостью до 100 см³ сыпучего материала, способный захватить и удержать твердый обломок крупностью до 3,2 см. Ковш установлен на многошарнирном механизме типа пантографа, который может перемещать его в плане внутри сектора с дугой 112° на расстояниях от 0,57 до 1,53 м в радиальном направлении. Кроме того, ковш может быть поднят на высоту до 0,89 и опущен в грунт на глубину 0,46 м, считая от горизонтальной поверхности.

Движение ковша вперед и назад, а также перемещения его по азимуту осуществляются с помощью трех электромоторов. Вертикальные перемещения сверху вниз происходят под действием заранее напряженной пружины, а снизу вверх — с помощью электромотора, преодолевающего силу пружины. С помощью пружины манипулятор может нанести сильный удар по поверхности грунта, несмотря на слабую лунную гравитацию. Четвертый электромотор приводит в движение крышку ковша. Все моторы управляются с Земли.

При наибольшем удалении ковша в радиальном направлении его крышка своей плоской поверхностью ложится на поверхность грунта, действуя как прямоугольный жесткий штамп размерами 2,5×5,1 см. На меньших расстояниях она врезается в грунт боковой кромкой под различными углами. При открытой крышке ковш работает подобно ковшу экскаватора (рис. 3.14).

На рис. 3.15 показаны план участка поверхности, где проводились опыты с манипуляторами станции «Сервейер-3».

С помощью манипулятора проводились следующие эксперименты:

- статическое нагружение поверхности закрытой крышкой ковша или его острой кромкой;

- динамическое нагружение путем подъема ковша над исследуемой точкой и последующего освобождения замка пружины, которая толкает его вниз;

- рытье траншей и перемещение дисперсного материала и отдельных камней и комков;

- захват и раздавливание отдельных комков, взвешивание комков и камней;

- перемещение альфа-радиометра (только на «Сервейере-7»).

Работа манипулятора велась под контролем телекамеры, которая передавала на Землю изображения всех деформаций грунта. На рис. 3.16 показана траншея, открытая на Луне манипулятором «Сервейера-3», глубиной 18 см. Усилия, передающиеся на грунт, приближенно определялись по силе тока, потребляемого моторами, и их температуре на основании предварительных тарировок на Земле.

Основной частью альфа-радиометра является его головка. В головке прибора, опускаемой на грунт, содержится источник альфа-излучения в виде пластинки кюрия-242. Поток альфа-частиц попадает на поверхность исследуемого грунта и рассеивает-

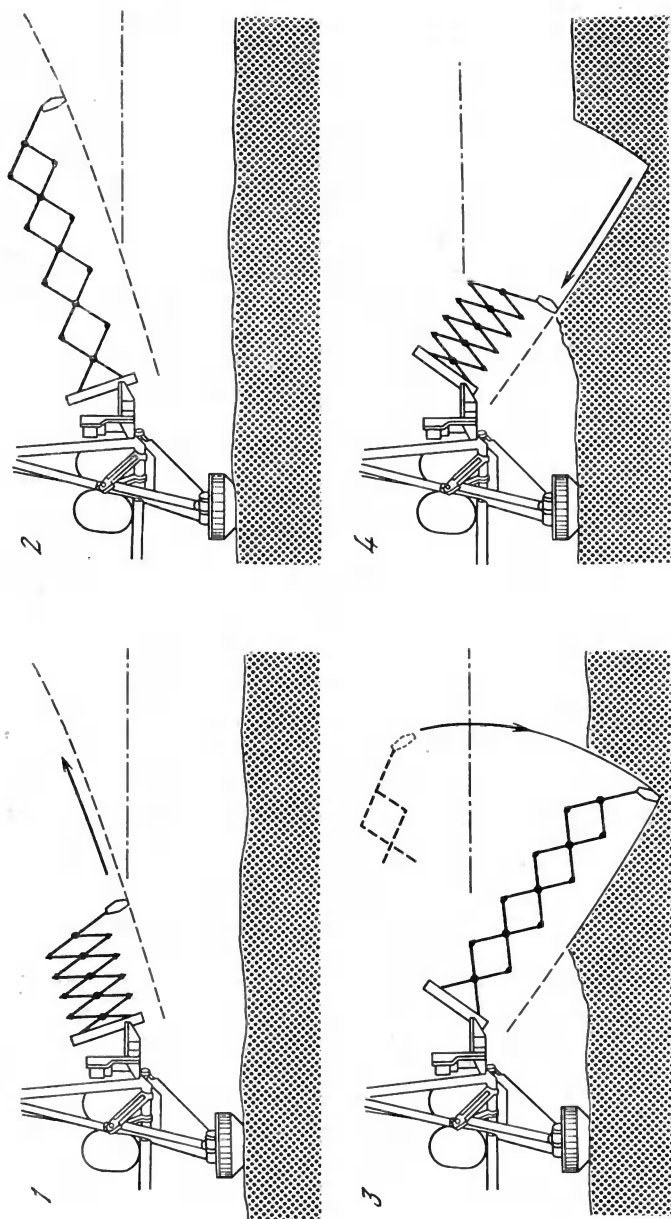


Рис. 3.14. Схема работы манипулятора при рытье траншей
1—4 — последовательные операции

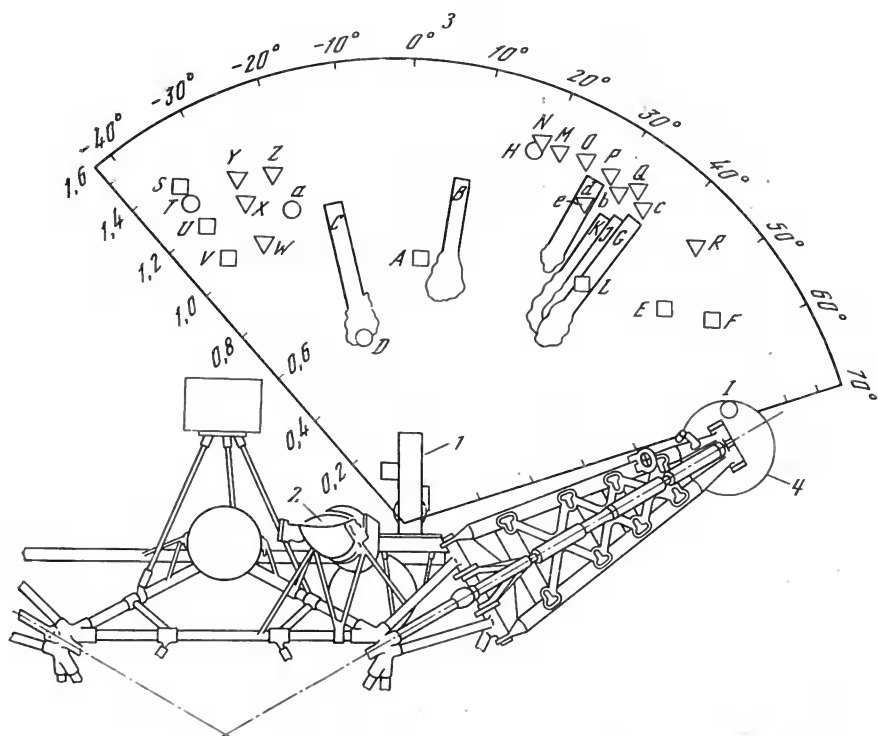


Рис. 3.15. План участка лунной поверхности, испытанного с помощью манипулятора «Сервейер-3» (вверху)

Продолговатые фигуры — траншеи, вырытые манипулятором; треугольники и квадраты — места воздействия ковша

1 — манипулятор; 2 — телекамера; 3 — градусы угломера; 4 — опора № 2

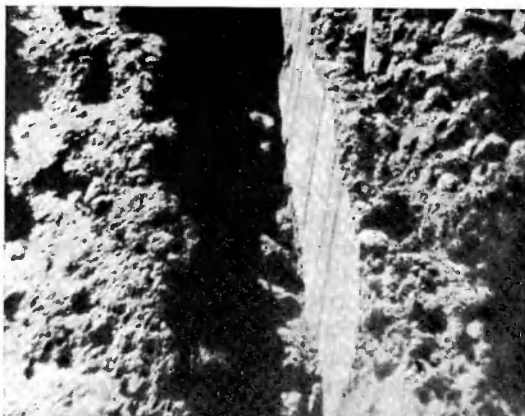
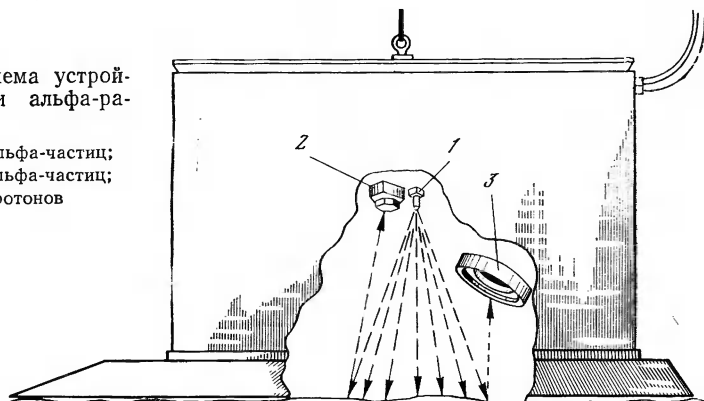


Рис. 3.16. Траншея, отрытая в реголите манипулятором станции «Сервейер-3»

ся ею, причем часть альфа-частиц отражается в обратном направлении и возвращается к головке прибора после соударения с ядрами атомов элементов, содержащихся в грунте. Вместе с ними к головке прибора направляются протоны, которые вылетают из ядер некоторых атомов при ударе альфа-частиц. Внутри

Рис. 3.17. Схема устройства головки альфа-радиометра

- 1 — источник альфа-частиц;
- 2 — детектор альфа-частиц;
- 3 — детектор протонов



головки установлены детекторы альфа-частиц и протонов. Сигналы обоих детекторов подаются на электронный блок, находящийся в отдельном контейнере, который производит подсчет поступающих частиц и определяет их энергию. Полученный спектр альфа- и протонного излучения грунта, вызываемых облучением его альфа-частицами, передается на Землю. Альфа-радиометры имелись только на станциях «Сервейер-5—7».

Головка прибора представляет собой металлический ящик размерами 12,5×15,2 см с горизонтальным щитом диаметром 30,5 см внизу. В центре щита имеется круглый люк диаметром 10,8 см. Схема головки дана на рис. 3.17.

При расшифровке результатов эксперимента использовалась библиотека альфа- и протонных спектров, полученных на Земле аналогичным путем для разных химических элементов, и учитывалось влияние фона радиации, который имел место при проведении опытов на Луне.

Постоянные магниты были укреплены на опорах станций «Сервейер-5—7». Они предназначались для выявления магнитных свойств грунтов в пунктах посадки.

В земных условиях были проведены опыты с магнитными устройствами станций «Сервейер», которые приводились в контакт с порошками базальта, риолита, дацита, перидотита, а также базальта с примесью железа, железными опилками и другими материалами, которые в различной степени обладают магнитными свойствами, и затем фотографировались. Анализ подобных же снимков, полученных телекамерами на Луне, позволял оценить магнитные свойства лунных грунтов, и в первую очередь присутствие в них железа.

По результатам исследований, проведенных станциями «Сервейер», американские ученые определяли толщину дисперсного слоя грунта (лунного реголита), его гранулометрический и химический состав, механические свойства и особенности де-

формации поверхности при механических воздействиях и под действием газовых струй.

Толщина дисперсного слоя на поверхности Луны, образуемого реголитом, оценивалась американскими учеными по снимкам АЛС «Сервейер» и искусственных спутников Луны «Лунар-Орбитер», сделанным в тот же период. Она определялась различными путями. Один из них основан на измерении глубины кратеров, кольцевые валы которых сложены крупными скальными обломками. Частично эти кратеры углублены в подстилающий скальный слой, и их глубина несколько больше толщины дисперсного слоя реголита. Толщина реголита в местах посадки станций «Сервейер» определялась по первоначальной глубине наименьших кратеров с крупнообломочными валами и первоначальной же глубине наибольших свежих кратеров, в валах которых совсем не было крупных обломков.

Действительная толщина реголита, вероятно, значительно изменяется на каждой площадке, и лишь ограниченное число кратеров относится к интересующим исследователей типам. Поэтому описанный метод определения толщины реголита является приближенным.

Другой способ основан на предположении, что в подстилающем реголит слое имеются крупные пустоты, куда может утекать слабосвязный пылеватый грунт, образующий реголит. В результате такой утечки должны образоваться кратеры, лишённые кольцевого вала. Такого типа удлинённые кратеры имеются в месте посадки «Сервейера-7». Толщина реголита может быть определена исходя из угла естественного откоса склонов этих кратеров (около 35°) и ширины по верху.

В месте посадки «Сервейера-7» подстилающий слой, по-видимому, состоит из крупных обломков, выброшенных из гигантского кратера Тихо, и толщину реголита описанным выше способом определить невозможно. Однако, судя по глубине траншей, вырытых манипулятором «Сервейера-7», она там значительно меньше, чем в районах посадки других станций «Сервейер».

Американские ученые приводят следующие данные о предполагаемой толщине реголита, полученные этим способом в месте посадок АЛС:

АЛС	С-1	С-3	С-4	С-6	С-7
Толщина реголита, м	1—3	1—27	3—5	8—10	0,02—0,15

Третий способ определения толщины слоя реголита основан на использовании закона распределения размеров лунных кратеров, установленного для такого состояния поверхности, когда с течением времени продолжают возникать новые кратеры и одновременно уничтожаются старые, но общее их число и распределение по размерам остаются постоянными. Такое положение

Таблица 3.6

Толщина слоя реголита по измерениям станций «Сервейер»

АЛС	Слой реголита, м		
	минимум	в среднем	максимум
«Сервейер-1»	1,6	3,1	14,0
«Сервейер-5»	1—2	3,2	47,0
«Сервейер-6»	2,7	4,6	25,0
«Сервейер-7»	0,05	0,09	0,7

может возникнуть при весьма длительной бомбардировке поверхности, покрытой довольно толстым слоем реголита, небольшими метеоритами, которые не вызывают образования глубоких кратеров, затрагивающих подстилающий слой.

Наблюдения, проведенные с помощью станций «Сервейер», показали, что начиная с некоторого минимального диаметра кратеров при дальнейшем их уменьшении характер распределения числа кратеров в зависимости от диаметра остается одинаковым для всех мест посадки этих аппаратов. В особенности ярко это видно при сравнении распределения кратеров диаметром около 3 м в горном районе, где опустился «Сервейер-7», и в типично морских районах, где работали другие аппараты.

При анализе кумулятивных кривых распределения кратеров по их размерам установлено, что при метеоритной обработке уничтожение кратеров происходит путем их засыпки. Для того чтобы кратер не был уничтожен полностью, он должен иметь диаметр не меньше некоторого критического размера.

До кровли подстилающего реголит скального слоя кратер может дойти, если его диаметр будет не меньше чем четырехкратная толщина слоя реголита, так как массовые измерения размеров малых кратеров показали, что отношение глубины кратера к его диаметру в среднем равно 1 : 4. Исходя из этих соображений получены данные о вероятной толщине реголита (табл. 3.6).

Непосредственное отношение к физико-механическим свойствам лунного грунта имеет его гранулометрический состав, т. е. распределение зерен, входящих в состав реголита по их крупности, выраженное в процентах от веса изучаемого образца. При выполнении программы «Сервейер» вопросы гранулометрии исследованы очень детально. В основном использовался метод подсчета на телефотоснимках отдельных камней, обломков и крупных зерен с последующим переходом от распределения на поверхности к распределению внутри объема исследуемого грунта.

Оказалось, что от 4 до 18% заснятой поверхности грунта за-

нято зернами крупнее 1 мм, относящимися к крупнопесчаным, гравелистым и крупнообломочным частицам. Они распределены в общем неравномерно, однако крупные обломки группируются вокруг некоторых больших кратеров. Наибольшее количество крупнообломочного материала обнаружено в месте посадки «Сервейера-7», наименьшее — «Сервейеров-6 и -5».

Большая часть камней угловата, хотя попадаются и округлые. По-видимому, они довольно глубоко погружены в мелкозернистый грунт. Обломки большей частью имеют примерно одинаковые размеры в разных направлениях, но некоторые имеют форму плиток. Изредка встречаются узкие острые осколки.

У большинства крупных обломков поверхность более светлая, чем у мелких. На поверхности заметны многочисленные точки, выбоины и закругления острых кромок, которые, возможно, связаны с бомбардировкой мелкими частицами. Один из камней, имевший сверху округлую форму, был перевернут манипулятором, причем оказалось, что его нижняя поверхность угловатая.

Плотность одного из камней, измеренного и взвешенного «Сервейером-7», оказалась равной $2,8-2,9 \text{ г/см}^3$. Такой же камень был разбит средним по своей силе ударом ковша манипулятора.

Крупнообломочные материалы чаще всего представлены кусками плотной скалы, но некоторые из них кажутся пористыми и трещиноватыми. Многие камни в месте посадки «Сервейера-7» и некоторые из камней в месте посадки «Сервейера-1» определенно пористые. Некоторые крупные образования представляют собой агрегаты из мелких частиц. Одни из них имеют плотное строение, другие же представляются лишь слабоуплотненными.

Сложный микрорельеф места посадки «Сервейера-7» хорошо виден на рис. 3.18, составленном из отдельных снимков этой станции.

Гранулометрический состав мелкозернистого материала определяли с помощью анализа фотоизображений отдельных участков поверхности, прилегающей непосредственно к АЛС. Участки выбирались таким образом, чтобы они были представительными для окружающей местности и не имели следов воздействия станции или газовых струй. Нарушенные участки изучались отдельно, как и участки отложения обломков, выброшенных из близлежащих кратеров.

На первом этапе обработки были получены законы распределения фракций крупностью от 1 мм до 1—10 см. На каждом обработанном снимке подсчитано от 1000 до 2800 отдельных частиц.

На рис. 3.19 представлены осредненные кумулятивные кривые распределения крупности частиц, лежащих на поверхности, для всех пяти площадок, обследованных станциями «Сервейер», построенные методом графического сглаживания без статисти-

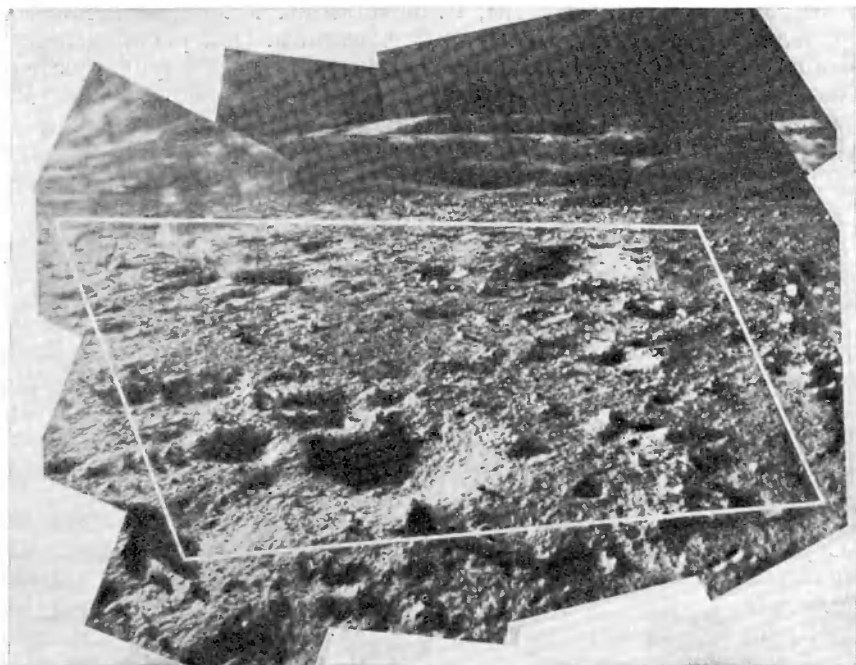


Рис. 3.18. Общий вид местности в точке посадки «Сервейера-7»

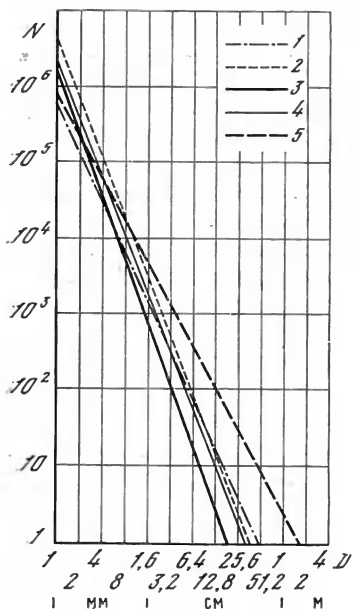


Рис. 3.19. Кумулятивные кривые распределения камней, комков и отдельных зерен на поверхности лунного грунта по результатам съемок «Сервейеров»

D — крупность камней и зерен;
 N — число частиц крупнее заданного диаметра D на 100 м^2 поверхности

ческого анализа и применения метода наименьших квадратов [62].

Для перехода к распределению в объеме принят принцип Розиваля, согласно которому отношение площадей, занимаемых частицами разной крупности на поверхности образца, к ее общей площади равно отношению их объемов к суммарному объему образца. Допустимость применения этого принципа к лунному реголиту не доказана, и по мере получения данных о бурении и результатов анализа грунтов по глубине она подлежит проверке.

Кроме того, надо знать пористость грунта. Поскольку определить ее по сделанным снимкам нельзя даже для поверхности вследствие недостаточного разрешения, расчеты американских ученых сделаны для двух вариантов: пористости $n=50\%$ и $n=0$, из которых более вероятным представляется первый.

Наконец, для того чтобы оценить содержание фракций, размеры которых лежат за пределами разрешающей силы снимков, принято, что наименьший диаметр частиц не может быть менее 1 мкм. Такое допущение сделано исходя из следующих предпосылок:

- оптические свойства поверхности реголита свидетельствуют о том, что большая часть зерен должна проходить сквозь сито с отверстиями 20 мкм, а поляризационные свойства говорят о наименьшей крупности 1 мкм;

- при механическом или взрывном дроблении силикатных горных пород невозможно получить зерна мельче 1 мкм;

- в межпланетном пространстве частицы мельче 1 мкм подвергаются выносу за пределы Солнечной системы под давлением света.

Исходя из сказанного получены уравнения для участков кумулятивных кривых при крупности зерен от 1 мкм до 1 мм. Уравнения имеют следующий вид:

$$N = KD^{\gamma},$$

где N — число частиц на площади 100 м², которые имеют крупность, равную и больше диаметра частиц D ; K и γ — параметры кривой распределения. В табл. 3.7 приведены значения параметров K и $-\gamma$ для двух вариантов пористости грунта: $n=0$ и $n=50\%$.

Содержание мелких фракций $D < 1$ мм при пористости в 50% составляет при этом от 64 до 92,7% по объему.

На основании полученных данных построены графики распределения частиц по диаметру D в диапазоне от 1 мкм до 4 мм (рис. 3.20), эквивалентные обычным кумулятивным кривым гранулометрического состава, если считать, что удельный вес зерен во всех фракциях одинаков.

По всем исследованным площадкам при пористости $n=50\%$ средний диаметр зерен составляет 0,033 мм при колебаниях от

Таблица 3.7

Значения параметров уравнений для кривых распределения по крупности частиц грунта в местах посадки станций «Сервейер»

Станция	$K \cdot 10^{-5}$	$-v$	
		$n=0$	$n=50\%$
«Сервейер-1»	5,0	2,58	2,45
«Сервейер-3»	33	2,21	2,02
«Сервейер-5»	12,5	2,42	2,27
«Сервейер-6»	19,1	2,33	2,17
«Сервейер-7»	7,9	2,47	2,29

0,005 до 0,088 мм. По принятой в СССР классификации песчаных грунтов СНиП II-15-74 грунт на площадках станций «Сервейер-1, -5, -6» относится к пылеватому песку, а на площадках станций «Сервейер-3 и -5» — к песку мелкому.

Дополнительные сведения о содержании мелких фракций в лунном реголите дал анализ фотографических изображений отпечатков опор. Как уже говорилось, станция «Сервейер-3» совершила при посадке три прыжка, при каждом из которых ее опоры попадали на новые места, а отпечатки предшествовавших соударений оставались на виду и при благоприятных условиях могли быть сфотографированы. Один из них был снят и передан на Землю. Оказалось, что на отпечатке хорошо просматривается вафельная структура деформированного алюминиевого листа на нижней поверхности опоры. При той нагрузке, которая действовала на опору, максимальная глубина вмятин листа могла достигнуть не более 0,1 мм. Специальные опыты на Земле, проведенные с дубликатом опоры на грунтах-аналогах при той же нагрузке и в тех же условиях освещения, показали, что для получения четкого изображения на грунте необходимо, чтобы он содержал значительную долю зерен мельче 0,06 мм (рис. 3.21).

Интересно отметить, что спустя 2,5 года неподалеку от «Сервейера-3» совершил посадку корабль «Аполлон-12» и астронавты Конрад и Бин подошли к аппарату. Они осмотрели и сфотографировали отпечаток опоры, о котором шла речь выше, и убедились в том, что он сохранился в полной неприкосновенности [59].

На рис. 3.22 представлен отпечаток опоры аппарата «Сервейер-6». Поверхность грунта рядом с отпечатком вся покрыта комками. Один из комков навис над откосом и отбросил глубокую тень. Сам же откос, сформированный под давлением гладкой обшивки конической части опоры, имеет ровную гладкую поверхность, которую можно получить только на мелкозернистом материале вроде муки или цемента. Наличие комков и спо-

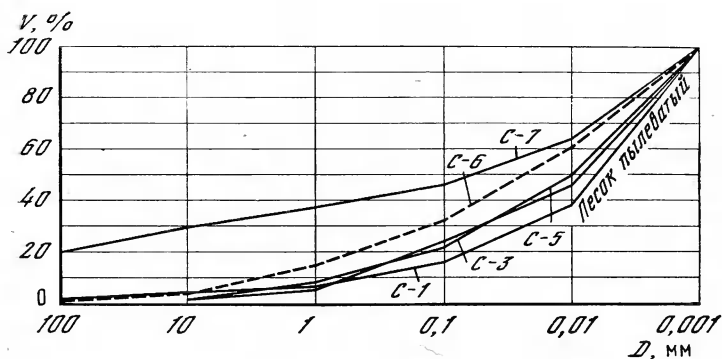


Рис. 3.20. Кумулятивные кривые распределения зерен лунного грунта по крупности

D — диаметры частиц; V — содержание частиц крупнее заданного диаметра в процентах по объему

способность их сохранять свою форму даже при действии изгибающего момента свидетельствуют о наличии сцепления между зернами, которое также может достичь заметной величины лишь в мелкозернистом грунте.

В результате радиационно-химических анализов [61, 62], выполненных с помощью альфа-радиометров, получены следующие данные о составе лунного грунта (табл. 3.8).

На основании полученных данных были составлены и подвергнуты анализу 11 минералогических моделей для горных районов Луны и 4 для морских. Для каждой модели была подсчитана плотность минерала, причем вероятное ее значение для горных районов оказалось равным $3,00 \pm 0,05$ г/см³ и для морских $3,20 \pm 0,03$ г/см³. Разница объясняется главным образом содержанием элементов группы железа. Повышенное содержание железа ведет к повышению плотности и одновременно к более темному цвету породы. Поэтому альбедо грунтов морских районов ниже, чем горных.

Сравнение химического состава с составами различных земных пород показало, что ближайшим аналогом для грунта морских районов Луны является базальт с высоким, а для горных с низким содержанием элементов группы железа, а также анортитовое габбро.

Эксперименты с магнитами привели к следующим выводам:

— небольшая примесь ферромагнитных материалов отмечается в грунтах всех исследованных районов Луны. Количество магнитного материала эквивалентно содержанию менее 0,25% чистого железа;

— налипание частиц лунного грунта на магниты зависит от их крупности, что было подтверждено лабораторными опытами

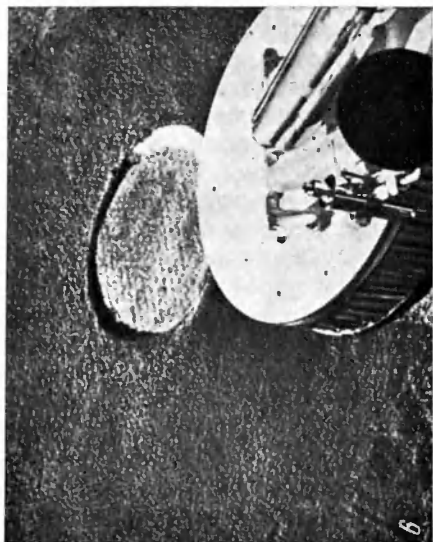
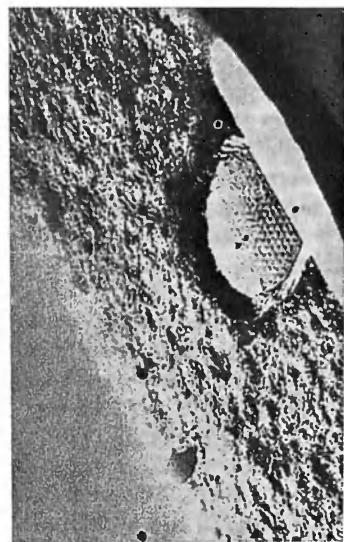


Рис. 3.21. След от опоры «Сервейера-3» (а, б) на Луне и отпечаток опоры, полученный в лаборатории на базальтовом порошке (в)

а — снимок «Сервейера-3»; б — снимок «Аполлона-12»

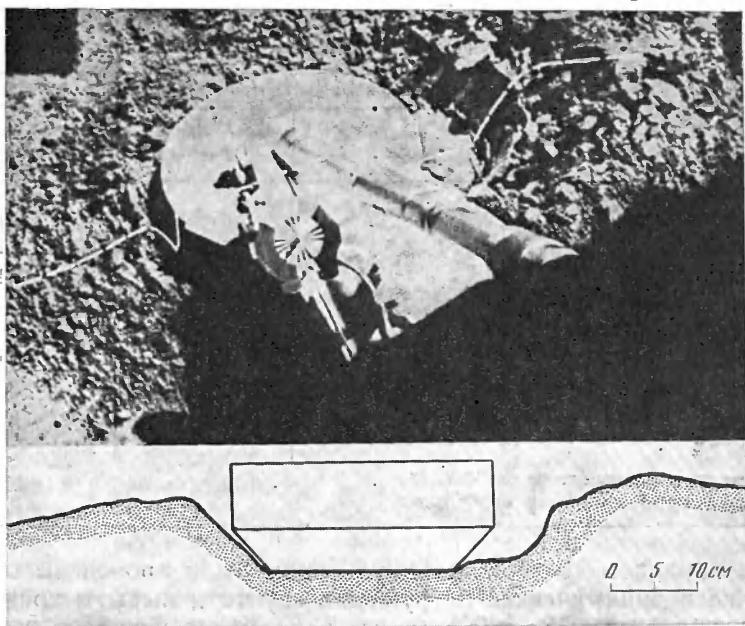


Рис. 3.22. Отпечаток опоры № 2 станции «Сервейер-6»

на порошке из молотого базальта, содержащего от 10 до 12% по объему магнетита в виде зерен крупностью около 25 мкм;

— обнаруженный на Луне магнитный материал может представлять собой либо магнетит, либо железоникелевые частицы метеоритного происхождения. Последнее считается менее вероятным. Возможная примесь частиц метеоритного происхождения меньше той, которая может быть выявлена методикой эксперимента.

Механические свойства лунных грунтов в программе «Сервейер» оценивались по глубине отпечатков мелких камешков, глубине погружения в грунт головки альфа-радиометра под действием его веса, по глубине вдавливания амортизаторов и опор посадочного устройства. Кроме того, производились расчеты устойчивости откосов, образующихся в лунном грунте при воздействии опор, учитывалось сопротивление эрозии, вызываемой воздействием газовой струи реактивных двигателей, и скорость распространения волн, возбуждаемых в грунте при посадочном ударе аппаратов. Более систематические опыты были проведены с помощью манипуляторов, но их было мало.

«Сервейер-1» передал снимки опор и амортизатора, по которым можно было определить глубину их погружения в грунт. «Сервейер-3» совершил посадку с тремя прыжками на площад-

Таблица 3.8

Содержание химических элементов в лунном грунте

Элемент	Содержание элементов в атомных процентах		
	«Сервейер-5» (проба 1)	«Сервейер-6» (проба 2)	«Сервейер-7» (проба 1)
Кислород	58 ± 5	57 ± 5	58 ± 5
Кремний	$18,5 \pm 3$	22 ± 4	18 ± 4
Алюминий	$6,5 \pm 3$	$6,5 \pm 2$	9 ± 3
Группа кальция *	13 ± 3	6 ± 2	6 ± 2
Группа железа **		5 ± 1	2 ± 1
Магний	3 ± 3	3 ± 3	4 ± 3
Натрий	< 2	< 2	< 3
Углерод	< 3	< 2	< 2

* Элементы с атомным весом от 30 до 47.

** Элементы с атомным весом от 47 до 65.

ку с наклоном $10-15^\circ$. Манипулятором были проведены статические и динамические нагружения грунта и вырыты траншеи глубиной до 18 см (см. рис. 3.16). «Сервейер-5» совершил посадку на крутой склон кратера. При этом его опоры пропахали борозды длиной в несколько десятков сантиметров. На этой же станции по команде с Земли включались на короткое время верньерные двигатели для наблюдения за эрозией поверхности. «Сервейер-6» проводил аналогичные опыты на горизонтальной площадке и затем путем включения всех трех верньерных двигателей на 25 с совершил прыжок высотой 3 м и длиной 4 м. «Сервейер-7» сел на поверхность, усеянную камнями и обломками. С помощью манипулятора были проведены опыты с нагружением поверхности грунта и рытье траншей, причем была обнаружена твердая порода на глубине от 1 до 15 см. При переносе головки альфа-радиометра производились наблюдения за вдавливанием ее в грунт под действием собственного веса.

Рассмотрим прежде всего косвенные данные о несущей способности грунта на разной глубине. Несущей способностью называется среднее давление под подошвой тела, погруженного в грунт той или иной силой на эту глубину.

Глубина следа мелкого камушка на рыхлой поверхности реголита, заметного на одном из снимков, свидетельствует, что ее несущая способность менее $0,1 \text{ Н/см}^2$. На глубине 1—2 мм под давлением головки альфа-радиометра несущая способность около $0,2 \text{ Н/см}^2$. По отпечаткам амортизаторов «Сервейеров-5 и -6» несущая способность на глубине 2 см составляет $1,7 \text{ Н/см}^2$. На глубине около 5 см при вдавливании опор «Сервейера-1» несущая способность оказалась равной $5,4 \text{ Н/см}^2$. Следовательно, в

пределах нескольких сантиметров несущая способность быстро увеличивается с глубиной.

Отпечаток, оставленный амортизатором станции «Сервейер-1», представляет собой цилиндрическую лунку с вертикальными стенками глубиной 2—3 см, у «Сервейера-3» 2,5 см, «Сервейера-6» 5,8 см, «Сервейера-7» 3 см. На дне отпечатка амортизатора «Сервейера-6» видна выпуклость в центре, образованная, видимо, грунтом, сначала проникшим внутрь амортизатора, а затем высыпавшимся обратно.

Если допустить, что при всех посадках произошло разрушение амортизаторов и максимальное давление в подошве при максимальной глубине вдавливания равно 28 Н/см^2 , то по приведенным выше данным о глубине лунок можно приблизительно подсчитать модуль общей деформации E_0 по формуле

$$E_0 = 0,79 (1 - \mu_0^2) D \frac{P}{s} = 0,79 (1 - 0,3^2) \cdot 18 \cdot \frac{28}{s} = \frac{362}{s} \text{ Н/см}^2,$$

где s — глубина вдавливания в см.

Наземные испытания станций «Сервейер» показали, что разрушение амортизаторов могло происходить при меньших давлениях, а именно при 18 и 24 Н/см^2 . В связи с этим модуль общей деформации по данным, полученным на разных станциях, изменялся от 40 до 145 Н/см^2 .

Как уже говорилось, благодаря прыжкам и горизонтальным перемещениям станций удалось сфотографировать некоторые отпечатки их опор, а по осциллограммам усилий в шасси определить нагрузки на них. По этим данным можно вычислить несущую способность и модуль общей деформации для вдавливания опор. Например, у «Сервейера-3» максимальная нагрузка на опору № 3 составляла 1800 Н, площадь контакта с грунтом 520 см^2 ($D=26,5 \text{ см}$) и глубина вдавливания 2,75 см. Соответственно несущая способность для этой глубины равна $5,4 \text{ Н/см}^2$, а модуль общей деформации $E_0=38 \text{ Н/см}^2$.

Однако в отчетах по программе «Сервейер» был принят другой метод для вычисления несущей способности при динамическом нагружении. Считая, что прямо под опорой в рыхлом реголите наблюдается местное уплотнение грунта от исходной плотности ρ_1 до конечной ρ_2 (в г/см^3), американские ученые определяли несущую способность $\sigma_{\text{дин}}$ (в дин/см^2) по формуле Чандейсона [62]:

$$\sigma_{\text{дин}} = \rho_2 \rho_1 (v^2 + ha) / (\rho_2 - \rho_1),$$

где h — глубина вдавливания в см, v — скорость удара опоры о поверхность в см/с , a — ускорение торможения в см/с^2 .

Так, для опоры № 2 «Сервейера-6» при третьем ударе о поверхность $v=150 \text{ см/с}$, $h=2,5 \text{ см}$, $a=1875 \text{ см/с}^2$ получено $\rho_1=1,1 \text{ г/см}^3$, $\rho_2=1,7 \text{ г/см}^3$. Максимальное суммарное давление σ под опорой составило $300\,000 \text{ дин/см}^2$.

Динамическая составляющая несущей способности, по Чандейсону:

$$\sigma_{\text{дин}} = \frac{1,7 \cdot 1,1}{1,7 - 1,1} (150^2 + 2,5 \cdot 1875) = 84\,600 \text{ дин/см}^2,$$

$$\text{или } \sim 0,85 \text{ Н/см}^2.$$

Статическая составляющая несущей способности

$$\sigma_{\text{стат}} = \sigma - \sigma_{\text{дин}} = 300\,000 - 84\,600 = 215\,400 \text{ дин/см}^2,$$

$$\text{или } \sim 2,15 \text{ Н/см}^2.$$

В данном случае динамическая составляющая около 28% общей несущей способности грунта.

Помимо этого метода обработки результатов измерений при посадке, проводилось математическое моделирование с помощью ЭВМ. При моделировании учитывалась масса станции, упругие характеристики ее посадочного устройства и свойства амортизаторов. Механические свойства грунта учитывались в виде реактивного давления (в дин/см²) под опорой так:

$$\sigma = \sigma_{\text{стат}} (1 + \xi h) + \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_2 - \rho_1} v^2,$$

где $\sigma_{\text{стат}}$ — статическая несущая способность в Н/см², ξ — постоянная, зависящая от трения в см⁻¹, h — глубина вдавливания в см, v — скорость соударения опоры с грунтом в см/с, ρ — плотность грунта в г/см³.

При моделировании задавались разные сочетания параметров $\sigma_{\text{стат}}$, ξ , ρ_1 , ρ_2 и строились кривые изменения усилий по времени для заданной величины скорости v с помощью ЭВМ. Затем эти кривые сопоставлялись с фактической осциллограммой и производился выбор той комбинации параметров, при которой достигалось наилучшее совпадение.

На рис. 3.23 представлены соответствующие графики для трех ног станции «Сервейер-6». Наилучшее совпадение расчетных и опытных данных получилось при $\sigma_{\text{стат}} = 3,6 \text{ Н/см}^2$, $\xi = 330 \text{ см}^{-1}$, $\rho_1 = 1,2 \text{ г/см}^3$, $\rho_2 = 1,6 \text{ г/см}^3$. Такие же параметры дали наилучшее совпадение для «Сервейеров-1, -3, -7». Для «Сервейера-5» лучшие результаты получились при $\sigma_{\text{стат}} = 2,8 \text{ Н/см}^2$ и $\rho_1 = 1,1 \text{ г/см}^3$.

Поскольку на станциях «Сервейер» не было приборов для прямого определения плотности грунта, данные об исходной плотности реголита были получены этим косвенным путем.

Были сделаны попытки определить упругие свойства лунного грунта по частоте колебаний станций «Сервейер», которые возникали при посадке и продолжались, постепенно затухая, некоторое время после нее. Эти колебания регистрировались акселерометрами, установленными на станциях, и были хорошо видны на полученных осциллограммах. Собственная частота коле-

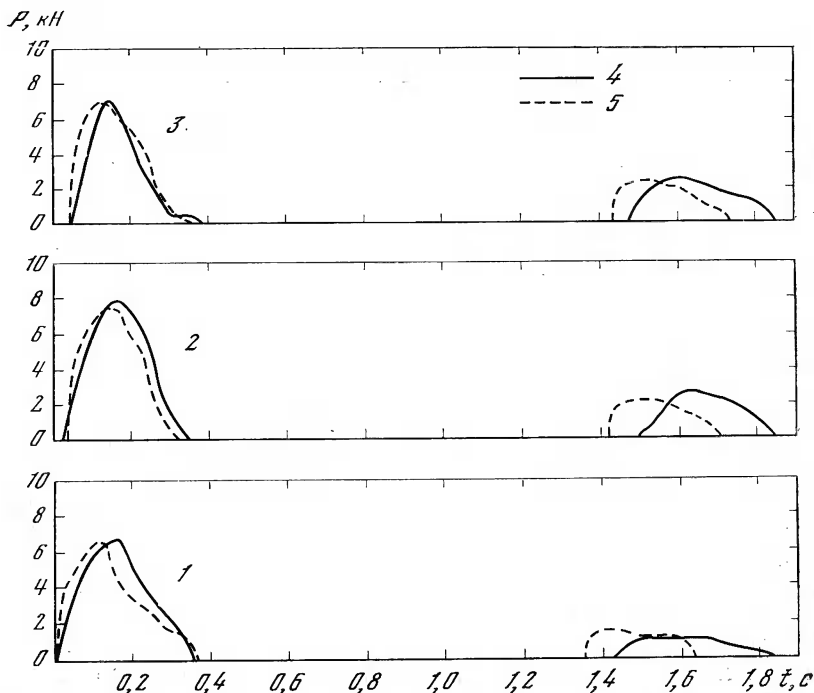


Рис. 3.23. Сравнение расчетных усилий в амортизаторах с фактически измеренными при посадке «Сервейера-6»

t — время с момента первого соприкосновения с грунтом; P — усилие в амортизаторе
1—3 — опоры 1—3 соответственно; 4 — результаты измерений; 5 — результаты расчета для поверхности, характеризующей сопротивлением $3,4 \text{ Н/см}^2$

баний станции, установленной на жесткую поверхность, равна $8 \pm 0,8 \text{ Гц}$. Фактически же на Луне она составляла $6,3\text{—}5,5 \text{ Гц}$. Снижение частоты могло произойти в результате взаимодействия опор с нежестким грунтом, который участвует в колебаниях и по которому распространяются волны сжатия и сдвига. Исходя из этого и задаваясь плотностью грунта и коэффициентом Пуассона, можно рассчитать скорость распространения продольных и поперечных волн в грунте и вычислить модуль упругости грунта. Расчет для станции «Сервейер-1» показал, что при коэффициенте Пуассона $\mu_0 = 0 \div 0,5$ скорость волн сдвига равна $16\text{—}28 \text{ м/с}$, а волн сжатия $33\text{—}77 \text{ м/с}$. Такие малые скорости в грунтах на Земле не наблюдаются. Даже в рыхлом песке они на порядок выше. По-видимому, изложенный метод пока не позволяет получить надежных результатов.

Траншеи, прорытые с помощью манипулятора, позволили прежде всего установить, что грунт с поверхности является бо-

лее рыхлым и по мере увеличения глубины становится более плотным и твердым. Глубина траншеи на месте стоянки станции «Сервейер-3» составляла от 5 до 17,5 см. На месте стоянки станции «Сервейер-7» рыхлый слой грунта, по-видимому, на небольшой глубине подстилался твердым слоем или отдельными крупными камнями. Глубина траншеи там колебалась от 1 до 15 см, причем во время операций по рытью траншей был отмечен случай зацепления ковша, по-видимому, за твердый предмет, который ковш не мог сдвинуть с места при максимальном давлении 80—200 Н/см². На рис. 3.16 видна вертикальная стенка траншеи, вырытой манипулятором станции «Сервейер-3». Ее ровность и хорошо заметные следы работы ковша указывают на мелкозернистый состав грунта. Наличие вертикального откоса свидетельствует о существовании сцепления между зернами. При высоте откоса 18 см в грунте без трения с $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ для устойчивости такой стенки необходимо сцепление порядка 0,015 Н/см².

Для оценки механических свойств грунта наибольший интерес представляют опыты со статическим нагружением закрытым ковшом. Нагружающая площадка размерами 2,5×5,1 см может в первом приближении рассматриваться как полосная нагрузка бесконечной длины. Глубина вдавливания в этом опыте была 2,5 см, нагрузка на штамп 50 Н. На поверхности грунта хорошо видны многочисленные трещины. Такие трещины образуются в плотных материалах с хрупкими связями между зернами в результате общего сдвига и выпираания грунта из-под штампа. В рыхлых материалах образования трещин на поверхности не наблюдается. Обнаружение трещин позволило американским ученым при обработке результатов опытов аппарата «Сервейер-3» применить известное решение Терцаги для общего сдвига [43], с тем чтобы обратным пересчетом вычислить сцепление и угол внутреннего трения грунта.

Максимальное удаление крайней трещины от кромки штампа зависит от угла внутреннего трения и ширины штампа. Следовательно, зная это расстояние, можно определить угол внутреннего трения. В опытах на «Сервейере-3» таким образом были установлены значения $\varphi = 35 \div 40^\circ$.

Несущая способность, по Р. Ф. Скотту [59], для общего сдвига определяется формулой

$$\sigma = g_c N_c c + g_\tau N_\tau \rho \alpha b + N_q \rho a z,$$

где g_c и g_τ — безразмерные коэффициенты, зависящие от формы штампа, для полосной нагрузки они равны 1,0; N_c , N_τ , N_q — безразмерные коэффициенты, зависящие от угла внутреннего трения грунта. Они находятся по графику, составленному Терцаги.

Семь опытов на «Сервейере-3» были проведены со статическим нагружением грунта закрытым ковшом манипулятора, при

Таблица 3.9

**Механические характеристики грунта при разной плотности
по данным станции «Сервейер-3»**

Пористость грунта п, %	Плотность грунта ρ , г/см ³	Сцепление c , Н/см ²	Угол внутреннего трения ϕ , град
67	1,0	0,009	42
50	1,5	0,014	39
33	2,0	0,017	37

этом глубина погружения изменялась в пределах 0,6—2,9 см и давление под нагружающей площадкой — в пределах 1,72 — 2,69 Н/см². Кроме того, было произведено 13 ударов по лунной поверхности, из которых 3 были сделаны открытым ковшом. Результаты опытов приведены в табл. 3.9.

На «Сервейере-7» проведено 16 опытов со статическим нагружением и 2 удара. Максимальная глубина вдавливания оказалась равной 4 см. По данным Р. Ф. Скотта, в месте посадки «Сервейера-7» грунт на глубине нескольких сантиметров обладает следующими свойствами: $\rho=1,5$ г/см³, $c=0,035 \div 0,072$ Н/см², $\phi=37 \div 39^\circ$. Зависимость глубины вдавливания ковша от вертикальной статической нагрузки, на него приведена на рис. 3.24.

Работа манипуляторов показала, что самый верхний слой толщиной в несколько миллиметров рыхлый и легко сжимаемый, но плотность и прочность быстро увеличиваются с глубиной уже на первых 2—3 см, что видно по увеличению потребления тока моторами манипуляторов.

На крупномасштабных снимках деформированной поверхности грунта, сделанных станциями «Сервейер», в нескольких случаях в местах нагружения ковшом были обнаружены трещины, которые позволяли предположить, будто на поверхности лежит тонкая хрупкая корочка. Однако в дальнейшем это не подтвердилось. Установлено, что трещины распространяются на глубину и материал распадается на отдельные блоки.

Снимки, полученные станциями «Сервейер», показали, что поверхность грунта разрушается газовой струей двумя путями — вследствие отрыва и уноса частиц в горизонтальном направлении и вследствие образования взрывных кратеров. Последние возникают после того, как в поры грунта проникает с поверхности сжатый газ, затем производится отсечка двигателя, и давление на поверхность резко падает. Стремясь вырваться из пор, газ устремляется вверх, увлекает за собой грунт и создает взрывные кратеры. Оба процесса тесно связаны с газопроницаемостью и связностью грунта.

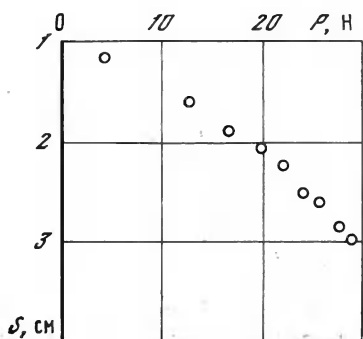
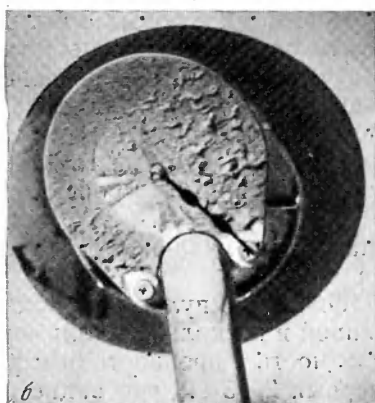
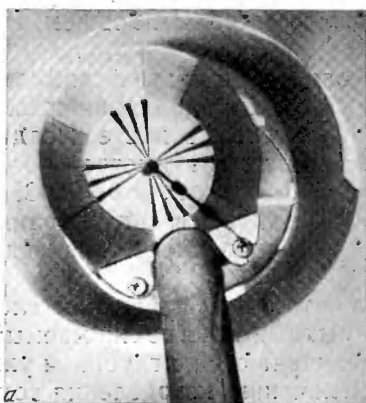


Рис. 3.24. Зависимость между нагрузкой P на ковш станции «Сервейер-7» и глубиной его вдавливания в грунт S (опыт № 2)

Рис. 3.25. Налипание лунного грунта на фотометрическую мишень «Сервейера-6»



При включении верньерных двигателей «Сервейера-5» струя сносила с поверхности мелкие частицы грунта и камни крупностью до 4,4 см. При отсечке двигателя под ним возник очень мелкий взрывной кратер глубиной 0,8—1,3 см и диаметром 20 см. Расчет показал, что газопроницаемость реголита примерно такая же, как проницаемость земной пыли, а сцепление колеблется от 0,007 до 0,12 Н/см² (по опытам с верньерными двигателями) и от 0,05 до 0,17 Н/см² по опытам с двигателями управления.

На рис. 3.25 показана фотометрическая мишень станции «Сервейер-6» до и после посадки на Луну. На правом снимке хорошо виден слой налипшего грунта. Похоже, что при посадке был отброшен комок из слипшихся частиц, который попал в мишень.

Сила адгезии грунта, налипшего на фотометрическую мишень «Сервейера-6», оценивается в 0,001—0,01 Н/см².

По наблюдениям за эрозией грунта и налипанием пыли был сделан вывод о том, что ее адгезия на деталях космической тех-

Т а б л и ц а 3.10

Физические и механические свойства лунного грунта по данным станций «Сервейер»

Станция	Крупность зерен, мм	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, Н/см ²	Плотность, г/см ³	Несущая способность, Н/см ²	Максимальная глубина вскрытия толщи грунта, см
«Сервейер-1»	Большая часть мельче 1	30—40	0,013—0,039	1,5 (в среднем)	3,5	8 (опора)
«Сервейер-3»	Значительная часть мельче 0,06	35—40	0,016—0,070	1,5 (в среднем)	2,0—5,0	17,5 (манипулятор)
«Сервейер-5»	Большая часть в пределах 0,002— 0,06	37	—	1,1 (в среднем)	2,7	12 (опора)
«Сервейер-6»	То же, что и в точках посадки С-1 и С-3	37	0,049—0,117	0,7—1,2 (в пределах нескольких мм) 1,6 (в пределах нескольких см)	0,4 (в пределах нескольких мм) 1,7 (в пределах нескольких см)	9 (опора)
«Сервейер-7»	То же, с большим числом камней	37—39	0,034—0,070	1,2—1,5 (в среднем)	3,3	15 (манипулятор)

П р и м е ч а н и е. Грунт по своей структуре мелкозернистый, слабосвязный, с примесью гравия и крупных камней.

ники, не являясь особенно сильной, может тем не менее осложнить решение ряда задач, стоящих перед космонавтами. Пыль может повредить работе механизмов и помешать плотному соединению различных деталей. Она может быть также занесена космонавтами в кабину лунного корабля и загрязнить его атмосферу.

В табл. 3.10 представлены основные результаты определенных физических и механических свойств лунного грунта, проведенных станциями «Сервейер». Сравнивая их между собой, а также с результатами определений станции «Луна-13», можно отметить, что, несмотря на большие расстояния между районами работы шести автоматических лунных станций, верхний слой реголита всюду обладает сравнительно постоянными свойствами. Везде лежит рыхлый пылеватый песок с примесью камней и комков. Он отличается малым сцеплением и довольно высоким внутренним трением, малой несущей способностью и высокой сжимаемостью. Колебания параметров, характеризующих перечисленные свойства, от района к району в общем не так велики, что свидетельствует о процессе формирования поверхностного слоя под действием одинаковых факторов.

Работа автоматических лунных станций «Луна» и «Сервейер» дала конкретные показатели для суждения о составе и свойствах верхнего слоя лунного реголита, достаточные для того, чтобы спроектировать посадочные устройства новых автоматических станций и лунных пилотируемых кораблей и решить задачи, связанные с движением по поверхности Луны людей и транспортных средств. В результате работы автоматических лунных станций «Луна» и «Сервейер» человечество получило сумму знаний о поверхностном слое лунного грунта, неизмеримо превосходящую все известное ранее. Для этого потребовалось в общей сложности менее двух лет!

3.4. Станции «Луна-16, -20 и -24»

Автоматические лунные станции «Луна-16» и «Луна-20» имели одинаковое устройство и назначение. «Луна-16» осуществила мягкую посадку 20 сентября 1970 г. в районе Моря Изобилия, а «Луна-20» — 21 февраля 1972 г. в материковом районе возле кратера Аполлоний-С.

Ракетная система посадки на Луну у обеих АЛС состояла из посадочной ступени с двигательным блоком и четырьмя опорами для посадки на грунт и самостоятельной ракеты Луна — Земля, укрепленной на ней. Ракета Луна — Земля предназначалась для доставки на Землю контейнера с образцом лунного грунта. Масса посадочной ступени к моменту прилунения составляла 1880 кг.

Грунтозаборное устройство устанавливалось на посадочной ступени. Оно состояло из бурового станка, штанги, на которой

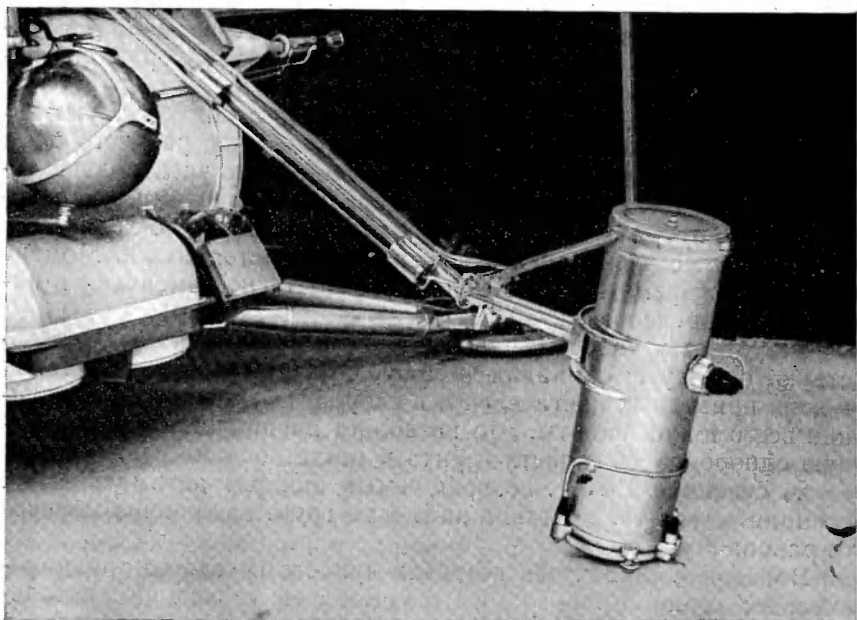


Рис. 3.26. Грунтозаборное устройство станций «Луна-16» и «Луна-20»

он был укреплен, и приводов, перемещающих штангу в вертикальном и горизонтальном направлениях. Рабочим органом станка служил трубчатый виброударный бур с резцами на конце, рассчитанный на работу в широком диапазоне горных пород, от несвязных пылевато-песчаных до твердых скальных. Максимальная глубина бурения 35 см. Вид грунтозаборного устройства изображен на рис. 3.26.

После прилунения станции открывался замок, фиксирующий грунтозаборное устройство, и штанга с буровым станком занимала вертикальное положение. Затем она поворачивалась на 180°, чтобы корпус станка при отводе штанги в горизонтальное положение был обращен рабочим органом к грунту. Наконец, буровой станок приводился в контакт с грунтом и начиналось бурение.

Станок работал от электродвигателей. Расход энергии и скорость углубления бура контролировались с Земли. По этим данным можно было судить о сопротивлении бурению. По окончании бурения бур извлекался из грунта и вводился вместе с образцом грунта в специальный контейнер возвращаемого аппарата. Контейнер герметически закрывался.

По окончании этих операций ракета Луна — Земля стартовала с Луны и направлялась к Земле. В конце полета спускае-

мый аппарат отделялся от ракеты и входил в атмосферу. После аэродинамического торможения раскрывался парашют и аппарат опускался в заданном районе, откуда подавал радиосигналы поисковой группе.

Бурение (прямой ход) при заборе грунта станцией «Луна-16» продолжалось 6 мин 14 с на полную величину рабочего хода бурового станка 350 мм. В конце рабочего хода электродвигатели автоматически отключались микровыключателями, расположенными внутри бурового станка. Во время прямого хода токи, потребляемые электродвигателями, были постоянными. Момент бурения во время прямого хода тоже почти не изменялся и находился в пределах 0,2—0,3 Н·м.

Результаты работы грунтозаборного устройства свидетельствуют об отсутствии каких-либо существенных изменений токов в цепи приводных двигателей и в скорости бурения на протяжении всего цикла работы. Это позволяет предположить достаточную однородность свойств грунта в месте посадки станции.

24 сентября 1970 г. возвращаемый аппарат автоматической станции «Луна-16» доставил на Землю грунт из типично морского района Луны.

В феврале 1972 г. для доставки лунного грунта из труднодоступного горного района был осуществлен запуск автоматической станции «Луна-20». Станция опустилась на поверхность в условиях лунного дня при высоте Солнца 46° над горизонтом, что позволило получить хорошие снимки лунной поверхности в точке посадки. Обзор местности, проведенный с помощью телефотометров, показал, что станция опустилась на сравнительно ровную и однородную поверхность, лишенную крупных отдельных лежащих камней.

Штанга грунтозаборного устройства, на которой был размещен буровой станок с пробоотборником, опускалась в грунт без разворота по азимуту. Угол места штанги при опускании бурового станка на грунт составил около 37° к горизонту. Ось бурового станка отклонялась от вертикали на 17° .

Бурение при отборе грунта станцией «Луна-20» проходило иначе, чем станцией «Луна-16». Буровой станок был включен для работы в 23 ч 14 мин по московскому времени при температуре 18°C на его корпусе и корпусе электродвигателя. После проходки скважины на 9 см произошла остановка бурового станка в связи с тем, что суммарный ток приводных двигателей превысил допустимую величину.

После второго включения двигателей скважина была пройдена до глубины 15 см. Здесь вновь произошло отключение приводных двигателей. После третьего включения двигателей бурового станка скважина была пройдена до глубины 34 см. Обратный ход станка проходил без осложнений и продолжался 9,8 с.

Весь процесс отбора пробы грунта (без времени разворота штанги и закладки снаряда в ампулу) продолжался около

16 мин, причем время чистого бурения составило 4 мин 34 с, т. е. средняя скорость бурения равнялась 76 мм/мин.

С целью проверки влияния температуры и вакуума на работу механизма бурового станка 23 февраля в 2 ч 15 мин после уборки снаряда с отобранной пробой в возвращаемый аппарат было проведено пробное включение бурового станка на обратный и затем прямой ход с включенным ударным механизмом. При этом зафиксирована нормальная работа всех механизмов станка. Следовательно, изменения скорости бурения и заклинивания происходили из-за особенностей взаимодействия бурового снаряда с лунным грунтом.

Цикл бурения АЛС «Луна-20» можно разбить на четыре этапа (первое, второе и третье бурения и обратный ход).

1-й этап — бурение на глубину от 0 до 9 см. На этом этапе можно выделить два участка: первый (глубина проходки от 0 до 4,7 см) характеризуется постоянной скоростью подачи 8,1 см/мин и небольшой величиной суммарного тока. Он представляет собой участок хода бурового снаряда до контакта с грунтом, т. е. участок холостого хода; второй участок (глубина от 5 до 9 см) характерен почти постоянной скоростью проходки 6 см/мин и значительным увеличением последовательно возрастающего суммарного тока приводных двигателей вплоть до срабатывания токозащиты.

2-й этап — бурение на глубину от 9 до 15 см. В целом этот этап, как и первый, может быть разбит на несколько участков.

Первый участок (от 9 до 11,5 см) характеризуется значительной величиной скорости проходки (до 10,7 см/мин) и сравнительно небольшой величиной суммарного тока. При дальнейшей проходке (от 11,5 до 15 см), как и на первом этапе, наблюдалось уменьшение скорости от 10,7 см/мин с таким же, как и на первом этапе, постепенным возрастанием суммарного тока вплоть до срабатывания токозащиты.

3-й этап — бурение на глубину от 15 до 34 см. Этот этап также можно разбить на участки. Первый — отсутствие проходки в течение 8 с с одновременным резким возрастанием величины суммарного тока от 4 до 7,5 А. Второй (от 15 до 19 см) — резкое увеличение скорости проходки до величины, превышающей паспортную скорость подачи вращателя бурового станка (24 см/мин), с одновременным возрастанием суммарного тока от 7,5 до 8,8 А. Третий участок (от 19 до 28 см) — снижение скорости проходки от 24 до 6 см/мин. При этом суммарный ток приводных двигателей снизился до 5 А и оставался постоянным на всем этом участке. Четвертый участок (от 28 до 30 см) характеризуется резким увеличением скорости проходки до 12 см/мин при постоянстве суммарного тока (5 А). Пятый участок (от 30 до 34 см) — дальнейшее резкое увеличение скорости проходки до величины 22,8 см/мин, превышающей паспортную скорость подачи бурового снаряда. Это увеличение скорости

проходки сопровождалось резким возрастанием суммарного тока до срабатывания устройства защиты по току. На глубине 34 см бурение было прекращено.

4-й этап — обратный ход, как уже отмечалось, был проведен за 9,8 с, т. е. со средней скоростью 204 см/мин, что значительно превышает паспортную скорость при обратном ходе.

Анализируя эти данные и сравнивая их с результатами тарировочных испытаний, проведенных на грунтах-аналогах, а также с результатами бурения на станции «Луна-16», можно отметить, что характер процесса бурения на станции «Луна-20» резко отличался от бурения на первой станции. По всей вероятности, контакт бурового снаряда с поверхностью грунта произошел после холостого опускания бурового снаряда на 4,7 см. Таким образом, общая глубина проникновения бурового снаряда станции «Луна-20» в грунт составила около 30 см. На всех этапах работы бурового станка наблюдались участки с повышением скорости подачи станка по сравнению с минимальной паспортной скоростью 6 см/мин.

Как видно, бурение на станции «Луна-20» было более трудным, чем на «Луна-16». Полного объяснения этому пока нет [56]. Анализ скорости бурения говорит как будто об однородности грунта, но отмеченные здесь особенности бурения противоречат этому. Общий вес пробы, доставленной «Луной-20» на Землю, составил 50 г, т. е. вдвое меньше, чем в предыдущем эксперименте. Исследование обоих образцов проводилось в Приемной лаборатории Академии наук СССР (см. главу 5).

3.5. Отбор и доставка на Землю образцов лунного грунта станцией «Луна-24»

22 августа 1976 г. на Землю были доставлены новые образцы лунного грунта автоматической станцией «Луна-24». Отбор грунта был проведен в юго-восточной части Моря Кризисов, вблизи от береговой линии. Научная значимость доставленного грунта определяется прежде всего геологическими особенностями места посадки — уровень Моря Кризисов на 5 км ниже среднего уровня лунной поверхности и оно заполнено базальтовой лавой, сформировавшейся на самых поздних этапах магматической эволюции Луны. В нем присутствуют базальты разного типа, излившиеся последовательно во времени. Кроме того, в центральной части Моря Кризисов расположен маскон, т. е. область аномальной концентрации вещества Луны. Метеоритные взрывы перемешивают реголит на расстоянии до нескольких десятков километров, поэтому образцы грунта, доставленные станцией «Луна-24», являются весьма представительными и должны содержать частицы как поверхностного и глубинного, так и морского и материкового реголитов.

Для отбора образцов впервые на Луне было произведено

автоматическое бурение на глубину свыше 2 м. Для этого использована новая конструкция буровой установки, которая обеспечивала бурение скважины на Луне и взятие керна с глубины до 2,6 м. Автоматическое бурение скважины на Луне такой глубины потребовало разработки комплекса специальных устройств, позволяющих менять режим работы в зависимости от грунтовых условий и брать керн при минимальном искажении свойств пробы грунта. Грунтозаборное устройство АЛС «Луна-24» рассчитано на бурение лунного грунта различной крепости — от твердых скальных до непрочных пылевидных пород с вкраплением отдельных камней различных размеров.

Буровое грунтозаборное устройство состоит из следующих основных частей: буровой головки, буровой штанги с колонкой и механизмом забора грунта, механизма подачи буровой головки, механизма перегрузки керна, контейнера для укладки керна, системы автоматики и контроля.

В процессе бурения грунт поступал во внутреннюю полость штанги. Там помещались гибкая трубка — грунтонос и механизм, который подхватывал грунт и удерживал его в виде столбика на протяжении всего процесса бурения.

До глубины 120 см использовался режим вращательного бурения, а далее происходила смена способов бурения — с вращательного на ударно-вращательный. Общая глубина бурения составила 225 см. В связи с тем, что оно производилось с наклоном, общее заглубление по лунной вертикали составило около 2 м. Затем грунтонос с грунтом, находящимся во внутренней плоскости штанги, был извлечен из нее и намотан на барабан, размещенный в специальном контейнере, который был затем заключен в герметическую капсулу возвращаемого аппарата.

После приземления возвращаемого аппарата ампула с эластичным грунтоносом, содержащим колонку лунного грунта, была передана для исследований в Приемную лабораторию АН СССР. После извлечения контейнера из капсулы возвращаемого аппарата гибкий грунтонос перематывался на металлическую тарелку со спиральными желобами, на которой после рентгенометрии колонки грунта грунтонос разделялся на участки и переносился на отдельные исследовательские лотки.

Первичные исследования показали, что грунт неоднороден. Отдельные участки колонки имели значительное количество относительно крупных фрагментов. В нижней части колонки выделялись слои, отличающиеся по цвету. В целом цвет грунта коричневато-серый. Он значительно светлее грунта, доставленного «Луной-16», но существенно темнее грунта «Луны-20».

Просмотр отобранных наиболее крупных фракций показывает, что в образце довольно много магматических пород базальтового типа и пород, близких к его различным видам. Породы отличаются от тех, которые были в грунте «Луны-16» и совершенно не похожи на грунт, доставленный «Луной-20».

ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПОДВИЖНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ «ЛУНОХОД-1 И -2»

4.1. Устройство луноходов

17 ноября 1970 г. автоматическая станция «Луна-17» доставила в Море Дождей самоходный аппарат «Луноход-1» с аппаратурой, предназначенной для комплексного изучения свойств лунной поверхности, окололунного пространства и наблюдения космических объектов с поверхности Луны. 16 января 1973 г. в южной прибрежной части кратера Лемонье, являющегося заливом Моря Ясности, на поверхность Луны опустилась АЛС «Луна-21», доставившая «Луноход-2».

В обоих случаях были использованы посадочные ступени того же типа, что у АЛС «Луна-16 и -20», после прилунения которых луноходы съезжали на грунт и приступали к самостоятельной работе, превращаясь в подвижные лаборатории.

«Луноход-1» и «Луноход-2» по конструкции шасси и оборудованию для изучения грунта мало отличались друг от друга. Данные о луноходах и проведенных ими исследованиях приводятся по материалам В. В. Громова, А. Л. Кемурджиана и др., опубликованным в работах [63—65].

Луноход представлял собой автоматический самодвижущийся аппарат, управляемый с Земли и позволяющий проводить исследования на значительном удалении от точки прилунения посадочной ступени. Среди научной аппаратуры, предназначенной для изучения грунтов, на нем были установлены прибор для определения проходимости (ПРОП) и рентгенометрическая аппаратура (РИФМА) для определения химического состава лунных пород. Телевизионное оборудование лунохода позволяло получать панорамы поверхности, на которых видны следы от колес машин, а также снимки отдельных участков, на которых видны детали природной и нарушенной поверхности с близкого расстояния. Об этих приборах и результатах, полученных с их применением, расскажем далее, здесь приведем данные, характеризующие луноход как своеобразный многоцелевой исследовательский аппарат для оценки физических и механических свойств лунного грунта по результатам его взаимодействия с самоходным шасси аппарата.

При конструировании лунохода была поставлена задача обеспечить высокую проходимость аппарата по неровной по-

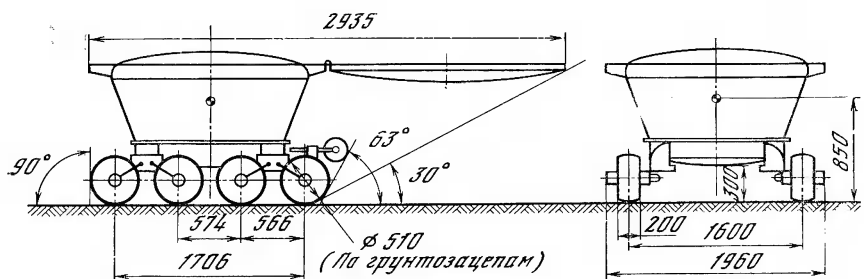


Рис. 4.1. Схема «Лунохода-1» (размеры в мм)

верхности, сложенной слабосвязным грунтом с малой несущей способностью и коэффициентом сопротивления движению $f = 0,25$, а также преодоление уклонов до 20° , сохранение статической устойчивости на склонах до 35° и надежное движение, несмотря на наличие физических препятствий при потреблении энергии не более 300 Вт. Масса аппарата определялась условиями ее доставки на Луну и должна была быть минимальной.

Конструкции и механизмы самоходного шасси были рассчитаны на длительную работу в лунных условиях при температуре от -170 до $+150^\circ\text{C}$, в вакууме 10^{-14} мм рт. ст. и при воздействии космической радиации. Габаритные размеры машины, определяющие ее проходимость, указаны на рис. 4.1.

Машина имела восемь колес с независимым электрическим приводом и независимой подвеской каждого. Легкий металлический каркас колес был обтянут по рабочей поверхности металлической сеткой, поверх которой наклепаны грунтозацепы (рис. 4.2). Электродвигатели и редукторы размещались внутри ступиц. Схема шасси обеспечивала хорошее приспособление к рельефу и уверенное преодоление препятствий. Шасси сохраняло подвижность при одновременном выходе из строя приводов нескольких колес. Мягкая торсионная подвеска с амортизаторами обеспечивала движение примерно в таком же режиме, как у земных автомобилей.

Была предусмотрена возможность движения на двух скоростях. Управление осуществлялось с помощью шести различных команд, подаваемых по радио с Земли. Движение происходило в режиме старт — стоп, это было необходимо потому, что операторы должны были иметь необходимое время для оценки условий движения и принятия решения на основании просмотра телевизионных изображений пути, которые сменялись один раз в период от 3 до 20 с. Скорость передачи изображений устанавливалась с Земли в зависимости от скорости передвижения и рельефа местности. Аппарат автоматически останавливался, если угол его наклона превышал 20° , а также при перегрузках электродвигателей. Для измерения пройденного пути служило свободно вращающееся девятое колесо.

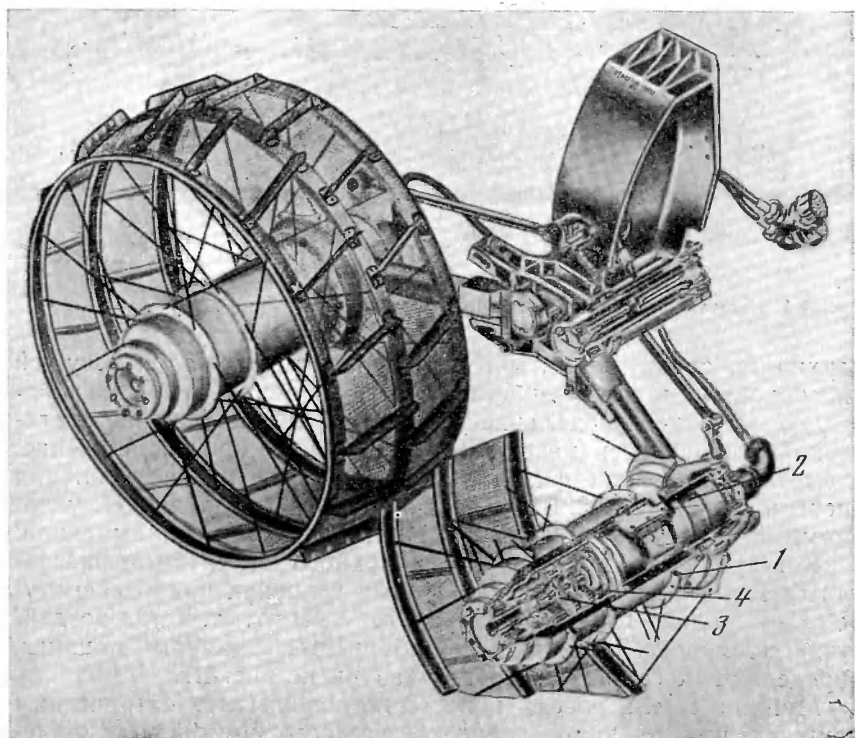


Рис. 4.2. Устройство колес лунохода

1 — ступица; 2 — электродвигатель; 3 — редуктор; 4 — тормоз

Технические данные лунохода были следующими:

Масса, кг	756
Колесная формула	8×8
Колесная база, мм	1706
Ширина колеи, мм	1600
Клиренс, мм	300
Диаметр колес по грунтозацепам, мм	510
Высота грунтозацепов, мм	20
Ширина обода, мм	200
Преодолеваемые препятствия, мм:	
траншея шириной	600
эскарп высотой	250
контрэскарп глубиной	400
Скорость движения, км/ч:	
первая	0,8
вторая	2,0

Радиус поворота борта с наибольшей скоростью, м:

в движении	3,5
на месте	0,8

Угол статической устойчивости, град:

продольной	45
поперечной	45

В ходе разработок лунохода проводились многочисленные эксперименты на моделях и макетах, а также методами математического моделирования. С помощью этих опытов было установлено, в частности, что луноход может преодолевать большую часть встречающихся на его пути кратеров, подъемы до 20° , спуски с торможением на первой скорости до 32° , а на второй до 26° . На макетах луноходов, двигавшихся по искусственным и естественным полигонам, по рельефу и грунтам, максимально приближающимся к условиям, существующим на Луне, проводились отработка дистанционного управления машиной и тренировка ее водителей.

4.2. Исследование взаимодействия шасси с лунным грунтом

Во время движения лунохода по поверхности Луны систематически измерялись пройденный путь, крен и дифферент машины. На основе полученных при этом данных были установлены статистические законы распределения продольных и поперечных уклонов поверхности, определены геометрические размеры кратеров, пересеченных луноходом, и их морфологические классы, получено уравнение зависимости количества кратеров на единице площади от их диаметров.

Путем графического интегрирования дифферентов лунохода по длине пути был построен продольный профиль трассы и проведен статистический анализ распределения высот поверхности рельефа.

Для изучения процессов взаимодействия колес лунохода с грунтом на шасси были установлены датчики, с помощью которых определяли крутящие моменты на колесах и скорость их вращения, а также угол наклона поверхности. Эффект проскальзывания ведущих колес определяли по истинному пройденному пути, который измерялся девятым колесом.

Во время движения лунохода получены данные о силе тяги, потребляемой энергии, мощности и скорости машины. Установлено, что эти показатели зависят от продольного уклона трассы. Они позволили определить средние значения параметров движения в зависимости от выбранного распределения уклонов лунной поверхности. Получены также характеристики взаимодействия шасси с грунтом.

Анализ данных о движении машины показал, что коэффициент проскальзывания колес на горизонтальных участках трассы колеблется от 0 до 15%, что может быть связано с неровностями поверхности и неоднородностью грунта на трассе. На склонах кратеров этот коэффициент увеличивается до 20—30%. Относительное сопротивление движению изменялось от 15 до 25%, а удельная свободная тяга — от 20 до 41% от собственного веса машины на Луне.

4.3. Определение механических свойств грунта

Основным прибором для определения механических свойств грунта на луноходе был специально сконструированный конусно-лопастной штамп ПРОП. Его рабочий орган состоял из конического штампа с углом при вершине 30°, диаметром основания 5 см и пересекающих его под углом 90° двух вертикальных лопастей. Ширина лопасти составляла 7,0 см, высота — 4,4 см.

Механизмы прибора размещались в верхней и нижней головках. Верхняя головка была укреплена неподвижно на корпусе лунохода, нижняя соединена с ней шарнирным параллелограммом, с помощью которого она могла опускаться и подниматься. Рабочий орган мог вращаться вокруг своей вертикальной оси (рис. 4.3).

Прибор был оснащен датчиками, которые позволяли установить глубину внедрения штампа, вертикальное усилие, приложенное к нему, угол поворота лопастей и соответствующий крутящий момент. Предусмотрены автоматические устройства, выключающие рабочий орган и возвращающие его в исходное положение при чрезмерной перегрузке или перемещении.

По команде с Земли рабочий орган опускался до контакта с поверхностью грунта, после чего начинал вдавливаться в него. Максимальное вертикальное усилие 200 Н. По достижении этого максимума или предельной глубины вдавливания 5 см конус с лопастями начинал поворачиваться вокруг своей вертикальной оси, причем происходил срез грунта по боковой поверхности цилиндра диаметром $D=7,7$ см и его основанию. Высота цилиндра равна глубине вдавливания штампа. Максимальный крутящий момент равен 5 Н·м, наибольший угол поворота 90°.

Несущая способность грунта определяется по формуле

$$R=4P/\pi d^2,$$

предельное сопротивление сдвигу — по формуле

$$\tau_{\text{пред}} = M/\Sigma W,$$

где P — вертикальная нагрузка на штамп, M — крутящий момент, d — диаметр отпечатка конуса, ΣW — суммарный момент

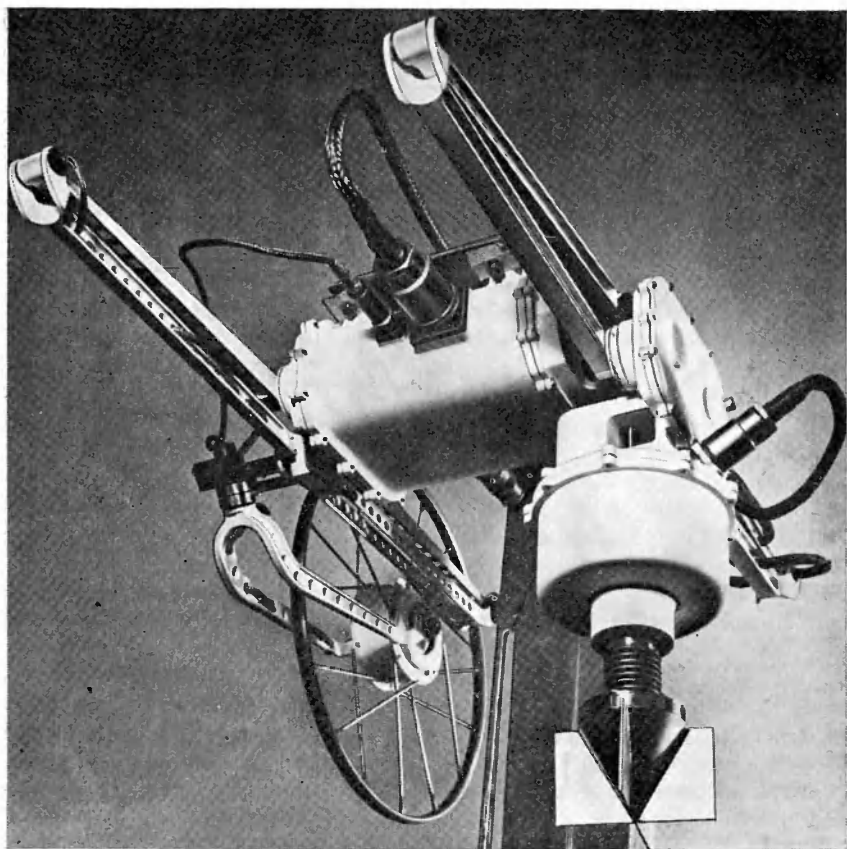


Рис. 4.3. Общий вид прибора для оценки проходимости (ПРОП)

сопротивления поверхности сдвига:

$$\Sigma W = \frac{1}{2} \pi D^2 (D/3 + h),$$

где D — ширина лопастей, h — глубина вдавливания.

По окончании перечисленных операций рабочий орган прибора возвращался в исходное положение.

ПРОП включали через каждые 15—30 м пути, а на участках с наиболее интересными геологическими и морфологическими формациями чаще. На рис. 4.4 представлены характерные кривые вдавливания ПРОП на различных элементах рельефа. Как видно, наибольшее сопротивление отмечалось на участках поверхности, усеянных камнями, а наименьшее — на кольцевых валах кратеров. Результаты повторного вдавливания ПРОП в одном и том же месте представлены на рис. 4.5. Кривые свиде-

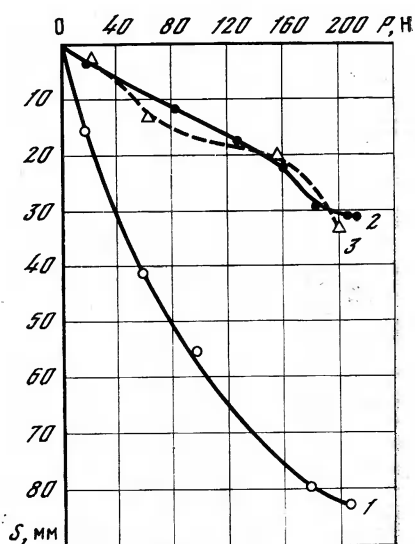
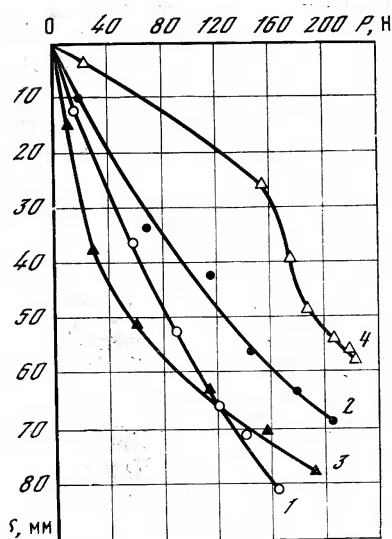


Рис. 4.4. Кривые вдавливания при первом нагружении конусно-лопастного штампа

P — нагрузка; S — глубина вдавливания

1 — на горизонтальном участке трассы; 2 — на склоне кратера; 3 — на кольцевом валу кратера; 4 — на поверхности, усеянной мелкими камнями

Рис. 4.5. Кривые вдавливания при повторных нагружениях конусно-лопастного штампа

P — нагрузка; S — глубина вдавливания. 1, 2, 3 — порядковые номера нагружений

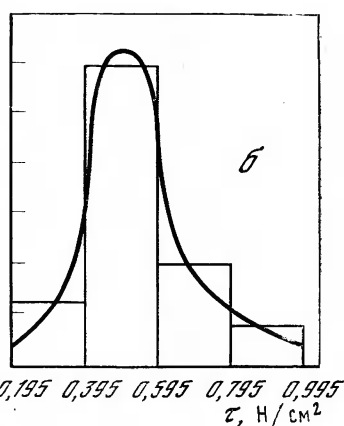
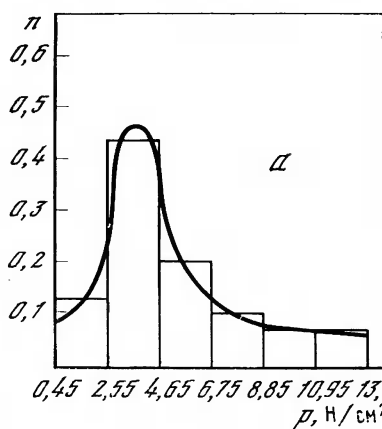


Рис. 4.6. Гистограммы и кривые статистического распределения несущей способности грунта p (а) и сопротивления вращательному срезу τ (б) на одном из участков трассы «Лунохода-1»

n — частота распределения

тельствуют о способности лунного грунта к значительному уплотнению и упрочнению при повторном нагружении. Это имеет большое практическое значение для проектирования многоко-лесных шасси и для разработки технических процессов при уплотнении грунтов Луны различными механизмами.

Многократное повторение опытов с прибором ПРОП позволило провести статистическую обработку данных; ее результаты представлены на графиках, где показаны статистическое распределение (в долях единицы) несущей способности грунта по трассе движения лунохода (рис. 4.6, а) и статистическое распределение сопротивления вращательному срезу (рис. 4.6, б).

Оказалось, что наиболее частое значение несущей способности равно $3,4 \text{ Н/см}^2$ при колебаниях от 2 до 10 Н/см^2 , а сопротивления вращательному срезу в среднем $0,48 \text{ Н/см}^2$ при колебаниях от 0,2 до $0,9 \text{ Н/см}^2$. Ученые, проводившие обработку этих экспериментов, считали, что сопротивление вращательному срезу может быть отождествлено со сцеплением грунта. Однако в силу специфических условий проведения экспериментов значения сцепления могут быть несколько преувеличены сравнительно с результатами опытов по прямому поступательному сдвигу в одной плоскости. Несущая способность самого верхнего пылевого слоя, вычисленная по глубине колеи от девятого колеса, оказалась очень низкой и колебалась в пределах $0,2\text{—}0,3 \text{ Н/см}^2$.

Не исключено, что в некоторых случаях конус ПРОП приходил в соприкосновение с погребенными в мелкозернистом грунте камнями или группами камней, что могло привести к некоторому повышению вероятности более высоких значений несущей способности в диапазоне $5\text{—}9 \text{ Н/см}^2$. Однако в большинстве случаев кривые вдавливания имели плавный характер, что свидетельствует о более или менее однородной структуре грунта в верхнем слое толщиной $5\text{—}10 \text{ см}$.

Чтобы обнажить более глубокие слои грунта, луноход время от времени делал несколько разворотов на одном месте, в результате чего верхний слой в $8\text{—}10 \text{ см}$ смещался. Последующие измерения с помощью ПРОП показали, что у подстилающего слоя механические свойства более высокие: несущая способность 10 Н/см^2 , а сопротивление вращательному сдвигу $0,6 \text{ Н/см}^2$.

Оценка механических свойств грунта проводилась также по деформациям поверхности, возникавшим после проезда машины; с этой целью использовались телефотопанорамы. Свойства грунта оценивали по глубине колеи и характеру его деформаций при прямолинейном движении лунохода и его повторных проходах.

Анализ фотопанорам показал, что верхний слой грунта состоит из мелких зерен, большая часть которых лежит за пределами разрешения телеснимков. Мелкие пылеватые зерна обнаруживаются также в более светлых участках на поврежденной поверхности.

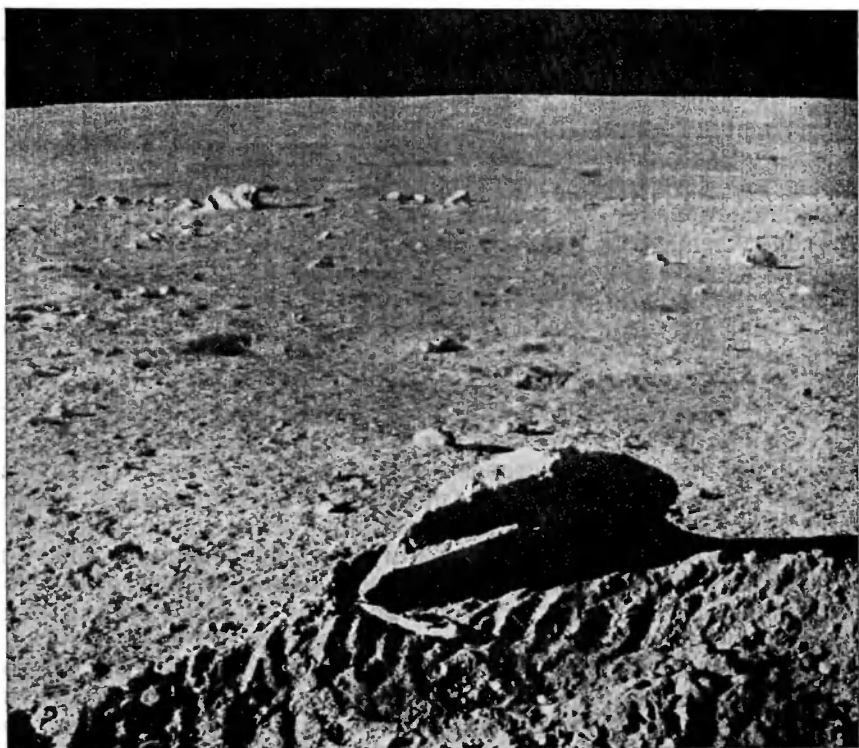


Рис. 4.7. Поверхность лунного грунта после прохода «Лунохода-1»
На переднем плане комок грунта и следы колеса лунохода

Под колесами луноходов грунт слегка уплотнялся и местами выпучивался в стороны. Возникали местные сдвиги, образовывались трещины и комья. Комья под колесами рассыпались на мелкие зерна. Комья указывают на существование некоторого сцепления в грунте.

Под легким девятым колесом путеизмерителя наблюдалось только образование четкой колеи глубиной 0,5—1,0 см без заметного выпирания грунта в стороны, что говорит о рыхлом характере самого верхнего слоя.

При движении по горизонтальной поверхности глубина колеи от главных колес машины колебалась в пределах от 1 до 5 см. При подъеме на склон она увеличивалась за счет проскальзывания. Наибольшие деформации происходили при поворотах машины, когда глубина колеи увеличивалась до 10 см. Самые глубокие колеи образовывались на кольцевых валах вокруг кратеров.

По трассе движения «Лунохода-1» встречались камни и почти неотличимые от них по внешнему виду комья, состоящие из слипшихся между собой мелких зерен. Камни не разрушались при наезде колес, комья рассыпались под их нажимом (рис. 4.7).

«Луноход-2» был оснащен более совершенным телевизионным оборудованием и имел улучшенную систему управления, которая позволила с его помощью провести более детальные исследования морфологии лунной поверхности. При движении «Лунохода-2» исследовались структура грунта, его механические характеристики, выявлялись и изучались неоднородности в строении верхнего слоя и устанавливались взаимосвязи физико-механических свойств грунта с геолого-морфологическими особенностями местности.

Помимо статистических исследований физико-механических свойств грунта в естественном залегании, проводились выборочные детальные исследования отдельных образований. Предварительная обработка результатов показала, что структура верхнего слоя грунта, определенная по характеру его деформации и разрушения, соответствует мелкозернистому материалу, обладающему заметным сцеплением и включающему в себя значительное число пылеватых частиц.

По результатам работы «Лунохода-2» [65] получены данные о распределении несущей способности (в $\text{H}/\text{см}^2$) по трассе его движения:

Лунные дни	I, II	III	IV	I—IV
Среднеарифметическое значение	3,65	3,77	4,16	3,8
Среднеквадратичное отклонение	1,7	1,81	2,14	1,89

Оказалось, что распределение несущей способности практически не зависит от геолого-морфологических особенностей исследованных районов. Наибольшие вариации несущей способности наблюдаются вблизи кратеров, где неоднородность механических свойств связана с процессами формирования верхнего слоя при образовании и деградации кратеров.

В пределах основных вариаций несущей способности угол внутреннего трения имеет величину $15-30^\circ$. Для наиболее вероятных значений несущей способности $2,7-3,2 \text{ H}/\text{см}^2$ угол внутреннего трения составляет примерно 20° , а для средних $3,6-4,6 \text{ H}/\text{см}^2$ — от 22 до 24° .

Сопротивление грунта вращательному срезу изменяется в пределах $0,2-0,9 \text{ H}/\text{см}^2$, увеличиваясь с глубиной.

Несущая способность на валу относительно свежих кратеров диаметром $1-1,5 \text{ м}$ составляет в среднем $1-1,5 \text{ H}/\text{см}^2$, на валу кратера диаметром 13 м она равна $2,5-3 \text{ H}/\text{см}^2$.

Основным показателем физического состояния грунта в естественном залегании является его коэффициент пористости.

Таблица 4.1

Неоднородность грунтов по трассам движения луноходов

Особенности грунтов	Количество измерений, %	Несущая способность, Н/см ²
Разрушение камня	0,5	—
Выходы твердого основания	3	Более 15
Однородный слой грунта	80	От 1,5 до 15
Грунт «с повышенной просадочностью»	4	—
Слой грунта на твердом основании на глубине не менее 10 см	7,5	—
Рыхлый грунт	3	Менее 1,5

Примечание. За 100% принято общее количество измерений.

Наиболее часто встречаются участки с коэффициентом пористости 0,8—1,0. Такое состояние характерно для относительно ровных участков со спокойным рельефом. Более рыхлый грунт встречается на участках со значительными уклонами и ярко выраженными процессами образования кратеров. Особо рыхлое состояние встречается редко.

При измерении механических свойств лунного грунта обнаружены участки с повышенной сжимаемостью, а также с небольшим слоем рыхлого материала на твердом основании.

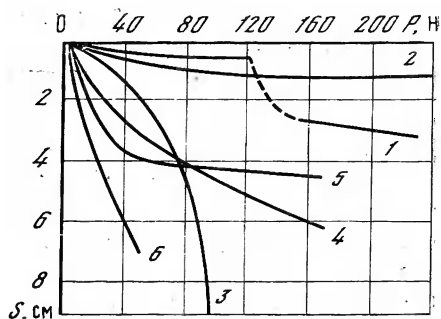
Изучение характера взаимодействия колес «Лунохода-2» с грунтом позволило получить данные для качественной оценки параметров проходимости при движении в различных условиях. По сообщению ученых, проводивших исследования с «Луноходом-2», разрушение грунта под колесами сопровождалось образованием трещин, сколов, крутых неосыпающихся стенок и комков.

Самый верхний слой глубиной 1—2 см особо рыхлый, несущая способность его составляет 0,2—0,4 Н/см². Статистическая кривая распределения несущей способности слоя в 10 см близка к кривой, полученной «Луноходом-1», но в среднем несущая способность несколько больше.

При наблюдении за работой лунохода удалось выделить характерные кривые вдавливания, указывающие на неоднородность строения грунта по глубине. В большинстве случаев в пределах 100 мм грунт был довольно однородным, однако в 3,0% случаев наблюдался выход твердого основания на поверхность, в 7,5% твердый слой залегал на глубине менее 100 мм, а в 4% случаев отмечались участки, на которых под верхней плотной коркой лежали более рыхлые слои; в 5% случаев были встречены очень рыхлые отложения с несущей способностью менее 1,5 Н/см².

Рис. 4.8. Кривые вдавливания, полученные «Луноходом-2»

- P — нагрузка;
 S — глубина вдавливания
 1 — упор штампа в камень;
 2 — каменистый грунт;
 3 — рыхлый слой на некоторой глубине от поверхности;
 4 — однородный грунт;
 5 — скала или крупный камень на некоторой глубине от поверхности;
 6 — однородный рыхлый грунт



Максимальный угол подъема, преодолеваемый «Луноходом-2», составлял 22—27°. Среднее значение коэффициента буксования 5—7%, что близко к данным «Лунохода-1».

Исследования двух луноходов показали, что неоднородность механических свойств поверхностного слоя тесно связана с его плотностью. А. К. Леонович, В. В. Громов и их сотрудники дали следующее объяснение этой неоднородности [65].

При ударно-взрывном возникновении лунного кратера вокруг него образуется вал из частиц грунта, перенесенных по баллистическим траекториям. Скорость падения частиц на вал тем больше, чем больше дальность их выброса. Процесс уплотнения грунта здесь связан со скоростью падения частиц. При малой скорости получается рыхлая структура и на внутренних частях кратерного вала грунт обладает наименьшей плотностью. По мере удаления от кратера плотность и несущая способность грунта возрастают.

Подобным же образом объясняется и особо рыхлая структура верхнего 10—20-миллиметрового слоя. По-видимому, в нем образуется масса мельчайших кратеров под действием микрометеоритов с малыми скоростями осаждения частиц, что не способствует плотной укладке.

При внедрении штампа прибора ПРОП на обоих луноходах [65] выявлена неоднородность грунтов по трассам движения (табл. 4.1).

На рис. 4.8 кривая 4 соответствует вдавливанию в однородный грунт. Начальная нелинейность кривой внедрения объясняется переменной площадью контакта с грунтом. При дальнейшем погружении штампа в грунт (на глубине более высоты штампа) кривая приближается к прямой. При наличии под слоем грунта твердого основания (выхода скальных пород или крупных камней) глубина внедрения не меняется при возрастании усилия погружения (кривая 5). На каменистом грунте наблюдалась небольшая осадка при предельном усилии внедрения (кривая 2). При упоре штампа в камень в ряде случаев происходило его разрушение (кривая 1).

Таблица 4.2

Физико-механические свойства лунного грунта в естественном залегании

Состояние грунта	Коэффициент пористости	Несущая способность, Н/см ²	Сцепление, Н/см ²	Угол внутреннего трения, град	Относительная частота распространения
Особо рыхлое	>1,3	<0,7	<0,13	<10	0,005
Рыхлое	1,3—1,0	0,7—2,5	0,13—0,25	10—15	0,25
Средней плотности	1,0—0,9	2,5—3,6	0,25—0,32	15—18	0,3
Плотное	0,9—0,8	3,6—5,5	0,32—0,4	18—22	0,3
Сильно уплотненное	<0,8	>5,5	>0,4	>22	0,15

Примечание. Авторы таблицы использовали собственную шкалу оценки состояния грунта, которая не совпадает с принятой СНиП П-15-74 и согласно которой пылеватый песок средней плотности должен иметь коэффициент пористости 0,6—0,8, а плотный песок <0,6.

Отмечены такие случаи, когда нарастание усилия внедрения значительно отставало от нарастания глубины (кривая 3) по сравнению с процессом внедрения в однородный грунт. При этом менялся знак кривизны кривой внедрения. Такой характер внедрения штампа можно объяснить наличием плотного верхнего слоя грунта и залегающих под ним более рыхлых слоев.

На глубине до 10 см в большинстве случаев (80%) грунт был достаточно однородным. Грунт с повышенной просадочностью встретился в 4% случаев от общего количества измерений.

В работе [65] приводятся сводные данные о физико-механических свойствах лунного грунта в естественном залегании, полученные при работах «Луноходов-1 и -2» (табл. 4.2).

Из таблицы видно, что в общем, по земным понятиям, лунный реголит на поверхности находится в рыхлом состоянии, и это подтверждается фотографиями колея луноходов, следов космонавтов и опор космических кораблей и аппаратов. Однако вследствие малой силы тяжести на поверхности Луны все виды движений по ней вызывают гораздо меньшие деформации, чем на грунтах той же пористости в земных условиях.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЕДИЦИЙ
«АПОЛЛОН»5.1. Задачи исследований
и районы деятельности экспедиций

Главная задача лунных экспедиций по программе «Аполлон» состояла в доставке на Луну астронавтов для отбора образцов лунного грунта с целью их подробного изучения на Земле. Во время пребывания на Луне астронавты должны были выполнить также многочисленные научные наблюдения и эксперименты, в состав которых входили и работы по исследованию грунтов.

Астронавтам было поручено доложить свои непосредственные наблюдения поверхностного слоя грунта, собрать и герметизировать образцы с поверхности и из неглубоких траншей и буровых скважин, оценить сопротивление грунтов внешним воздействиям различного рода. Они должны были определить глубину погружения опор лунной кабины в грунт, изучить следы ботинок при ходьбе по грунту разной плотности, провести наблюдения за глубиной колен от лунных транспортных средств и оценить условия движения по поверхности Луны. Предусматривались опыты по определению прочности грунта пенетрометрами, а также фотографирование природной поверхности и поверхности, подвергшейся различным внешним воздействиям. Было намечено устройство выемок и наблюдение за устойчивостью их откосов.

Все эти наблюдения и опыты, кроме отбора образцов для доставки на Землю, рассматривались как вспомогательные, в связи с чем большинство из них носило единичный характер и позволяло оценить в первую очередь качественную сторону исследуемых явлений и материалов. Тем не менее эти первые работы, выполненные человеком на Луне, представляют большой интерес и дают ответы на важные научные и прикладные вопросы.

Посадка лунных кораблей «Аполлон» была запланирована в характерных по морфологическим и геохимическим признакам районах Луны. Изучены морские и горные области, в том числе районы, геологическая история и особенности строения которых могут дать важные данные для развития представления о происхождении и формировании Луны и Земли.

Всего было осуществлено шесть успешных экспедиций «Аполлон» в период с 16 июля 1969 г. по 19 декабря 1972 г. (табл. 5.1). Полет корабля «Аполлон-13» сопровождался аварией, и экипаж вернулся на Землю, не высадившись на Луну.

Таблица 5.1

Характеристики мест посадки и работы по исследованию
грунтов экспедиций «Аполлон»

Экспедиция, дата	Район посадки	Исследования грунтов
«Аполлон-11» 16—24.VII 1969 г.	Море Спокойствия. Плоская равнина морского района, усеянная многочисленными мелкими кратерами	Сбор образцов грунта и отдельных камней с поверхности (около 25 кг), отбор проб с глубины 25—30 см, наблюдения за сопротивлением грунта внешним воздействиям и пылеобразованием
«Аполлон-12» 14—24.XI 1969 г.	Океан Бурь. Морской район с мягким волнистым рельефом и кратерами различных размеров	То же, а также отбор проб грунта с глубины до 80 см (около 50 кг), разработка траншейки, посещение АЛС «Сервейер-3», стереосъемка поверхности грунта
«Аполлон-14» 31.I—10.II 1971 г.	Кратер Фра-Мауро, южнее Моря Дождей. Материковый район, покрытый большим числом кратеров	Отбор образцов (около 43 кг), разработка траншейки, наблюдения за проходимостью ручной двухколесной тележки, пенетрация
«Аполлон-15» 26.VII—7.VIII 1971 г.	Район трещины Хэдли в Апеннинских горах	Отбор образцов (около 77 кг), рытье траншейки, бурение скважины на глубину 2—4 м, езда по поверхности Луны на луноходе (28 км)
«Аполлон-16» 16—27.IV 1972 г.	Горный район центрального плоскогорья. Равнина Хэйли на плоскогорье Декарт	То же, а также применение пенетromетра с самопишущим устройством, наблюдение за эрозией грунта газовыми струями и пылью. На луноходе пройдено около 27 км, собрано 110 кг грунта
«Аполлон-17» 7—19.XII 1972 г.	Горная долина, расположенная у юго-восточной оконечности Моря Ясности, к югу от кратера Литтров	То же. Собрано 113 кг лунной породы. На луноходе пройдено около 36 км

Исследования грунтов Луны, собранных по программе «Аполлон», еще не завершены. Основная часть доставленного на Землю материала оставлена для длительного хранения в расчете на то, что в будущем появятся новые, более тонкие методы анализа и приборы. Часть образцов хранится в герметичных контейнерах, в которых они были доставлены с Луны. Для первоначальных экспериментов НАСА выделила ученым ряда стран образцы лунных пород массой 2—3 г с обязательством возвратить их после окончания исследований. В Советском Союзе был

произведен обмен образцов, доставленных автоматическими станциями «Луна» на образцы, привезенные экспедициями «Аполлон».

Несмотря на большое число статей и докладов, посвященных анализам образцов лунных грунтов экспедиций «Аполлон», пока еще недостаточно обобщающих работ. Поэтому здесь мы будем говорить преимущественно о материалах научных работ, выполненных космонавтами непосредственно на Луне.

Исследованиями по механике грунтов, проводившимися на поверхности Луны, руководили американские ученые М. К. Костес, В. Д. Кэрвер, Дж. К. Митчелл и Р. Ф. Скотт. Излагаемые ниже данные основаны на официальных отчетах НАСА по программе «Аполлон» [66—71, 73], из которых использованы главным образом разделы «Сводка научных результатов» и «Механика грунтов». Кроме того, использованы данные из статей американских ученых [59, 72] и обзорной статьи Д. Ю. Гольдовского [74].

5.2. Лунная кабина, транспортные средства и научное оборудование для исследования грунтов

Ракетно-космическая система «Сатурн-5 — Аполлон» состояла из трехступенчатой ракеты «Сатурн-5» и трехместного пилотируемого корабля «Аполлон». Общая высота системы 110,6 м, начальная масса около 3 тыс. т. Система могла сообщить первую космическую скорость полезной нагрузке в 130 т и вторую космическую скорость полезной нагрузке в 44 т. Общая масса корабля «Аполлон» составляла 43,8 т. Корабль состоял из основного блока и лунной кабины. В свою очередь основной блок делился на двигательный отсек и отсек экипажа, а лунная кабина — на посадочную и взлетную ступени. Основной блок выходил на селеноцентрическую орбиту, где выполнял работу по заданной программе под управлением одного астронавта.

Лунная кабина предназначалась для доставки на Луну двух астронавтов, научного оборудования и транспортных средств для отправки с Луны астронавтов и собранных ими образцов лунной породы на селеноцентрическую орбиту, откуда основной блок корабля «Аполлон» доставлял их на Землю (рис. 5.1).

Посадочная и взлетная ступени лунной кабины имели общую начальную массу 14,7 т. Масса топлива 10,8 т. Каждая ступень была оборудована собственным двигателем. Двигатель посадочной ступени использовался для торможения лунной кабины при подлете к месту посадки и маневрирования при посадке, двигатель взлетной ступени — для старта с Луны и полета к основному блоку корабля. Кроме основных, были установлены 16 вспомогательных двигателей для управления кабиной.

Посадочная ступень была оборудована четырехстоечным шасси. На каждой стойке шарнирно крепилась тарельчатая опо-

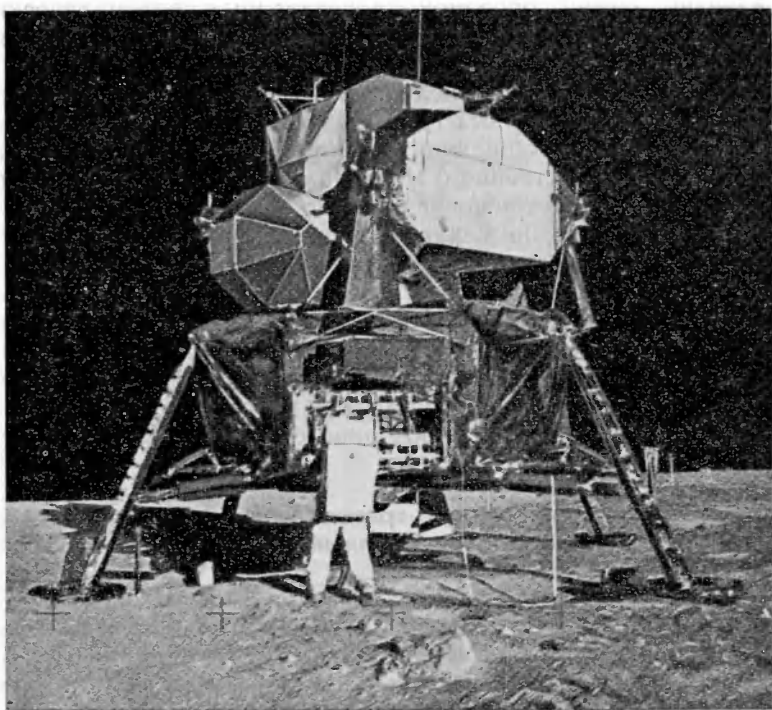


Рис. 5.1. Лунная кабина корабля «Аполлон-11» в Океане Бурь

ра диаметром 0,9 м, изготовленная из алюминиевых сот. На опорах смонтированы щупы, регистрирующие момент контакта с поверхностью грунта и подающие команду на выключение двигателя. Длина щупа 1,18 м. В момент касания с поверхностью щуп отламывался. При посадке на Луну масса посадочной ступени составляла около 6,5 т.

Расчетная скорость посадки около 1 м/с, при максимальной 3 м/с. Для амортизации удара при посадке в телескопических стойках шасси имелись сминаемые заполнители из алюминиевых сот. Каждая стойка при посадке могла укоротиться на 0,8 м. Это обеспечивало горизонтальное положение кабины при посадке на неровную местность. Нижняя часть двигателя посадочной ступени была расположена только на 0,46 м выше опор и тоже могла вступить в контакт с поверхностью. В связи с этим насадка двигателя была сделана из легко разрушающегося материала.

В процессе посадки струя двигателя вызывала эрозию поверхности грунта, поднимала облака пыли и отбрасывала крупные обломки на значительное расстояние. Тяга двигателя регу-

лировалась в пределах от 4760 до 44 670 Н. Диаметр выходного сечения сопла 1,5 м.

Взлетная ступень была укреплена над посадочной. Последняя после разделения использовалась в качестве стартовой платформы. Когда астронавты на орбите переходили в основной блок корабля, взлетная ступень могла быть направлена в сторону Луны для нанесения удара по поверхности, который регистрировался сейсмографами. Масса взлетной ступени составляла без топлива 2,2 т, а энергия ее удара о поверхность была эквивалентна энергии взрыва заряда тротила массой около 2 т. Для удара по поверхности Луны в нескольких случаях использовалась также третья ступень ракеты-носителя с массой 11 т.

В посадочной ступени лунной кабины размещались часть научного оборудования и лунные транспортные средства. Последние использовались только в экспедициях «Аполлон-14—17», астронавты кораблей «Аполлон-11 и -12» разносили свое оборудование вручную.

На корабле «Аполлон-14» использовалась ручная двухколесная тележка для перевозки образцов лунных пород и научного оборудования. На кораблях «Аполлон-15—17» применялись луноходы, управляемые астронавтами. Как тележка, так и луноходы использовались попутно для изучения условий движения колесных транспортных средств по поверхности лунного грунта.

Собственный вес тележки на Земле 90 Н, грузоподъемность 640 Н. Шины из полиэфирного корда имели наружный диаметр 398,8 мм и ширину 96,5 мм, камеры наполнены газом под давлением до 0,7—1,4 Н/см². Тележку можно было катить по поверхности с наклоном до 20°.

Луноход представлял собой четырехколесный электрический самоходный экипаж, рассчитанный на перевозку двух астронавтов, средств связи и навигации, научного оборудования и образцов лунных пород (рис. 5.2). Собственный вес лунохода на Земле 2110 Н, вес брутто с астронавтами и грузом 6900 Н. Длина машины 3,1 м, ширина 2,06 м, высота 1,14 м, колесная база 2,29 м, ширина колеи 1,83 м, клиренс 0,36 м. Каждое колесо имело наружный диаметр 0,81 м и ширину 0,23 м. Обод колеса был сплетен из металлической проволоки и имел титановые ограничители прогиба. К ободу прикреплены грунтозацепы из титанового сплава. Каждое колесо имело индивидуальный электропривод мощностью $\frac{1}{4}$ л. с. Ресурс хода лунохода 65 км, максимальная скорость 13 км/ч. Луноход рассчитан на преодоление склонов крутизной до 20°, препятствий высотой до 0,3 м, трещин шириной до 0,7 м. Источниками энергии служили серебряно-цинковые батареи.

Экспедиции «Аполлон» использовали разнообразное научное оборудование, в состав которого входили несколько фото- и кинокамер, камеры цветного телевидения, научные приборы, предназначенные для установки на поверхности Луны, радиоизотоп-

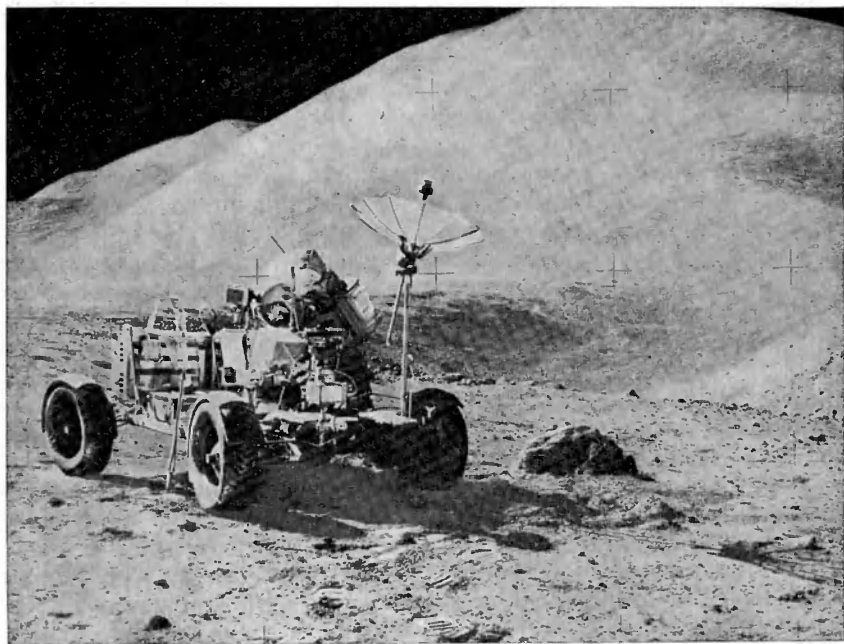


Рис. 5.2. Луноход экспедиции «Аполлон-15» в районе горы Хэдли Дельта

ная энергетическая установка для обеспечения их длительной работы, буровые инструменты и грунтоносы, а также ручной инструмент, используемый астронавтами при геологических исследованиях (рис. 5.3).

С точки зрения грунтоведения наибольший интерес представляет буровое и геологическое снаряжение, а также фотооборудование для крупномасштабных снимков поверхности грунта. В комплект инструментов, которыми пользовались астронавты для геологических исследований, входили: лопатка, решетчатый совок, решетчатый захват, геологический молоток и удлинительная ручка к ним, а также грунтоносы для сбора образцов грунта и их герметизации, щетки для очистки образцов, объединенные с лупой и разметчиком образцов, пружинные весы и гномон. Последний представлял собой треногу с подвешенным на ней стержнем, который принимал вертикальное положение и служил для фиксирования местной вертикали на фотоснимках. Для сбора образцов использовались мешочки из тефлона и герметичный контейнер для них, а также специальные контейнеры, обеспечивающие сохранение высокого вакуума в течение длительного времени.

Молоток использовался для раскалывания твердых обломков скал и забивания в грунт грунтоносов. Трубчатые грунтоносы были изготовлены из нержавеющей стали. Длина каждой трубки 38 см и более, внутренний диаметр от 1,97 до 4,13 см. Верхний конец грунтоноса был закрыт наглухо, на нижний навинчивалась зубчатая коронка из твердой стали, а после отбора образца — герметизирующая крышка. Захват рассчитан на мелкие образцы крупностью от 1 до 6,3 см, которые трудно взять рукой в перчатке. Длина его 61 см. Длина удлинительной рукоятки 61 см, диаметр 2,5 см. С помощью защелки она могла крепиться к геологическому молотку.

Для бурения скважин диаметром 25 мм на глубину 3 м применялся ручной электрический колонковый бур. Рабочий орган бура мог одновременно вращаться, совершая 300 об/мин, и наносить удары по забою скважины (2270 удар/мин). Коронки бура были изготовлены из карбида вольфрама и могли работать без системы охлаждения и при наличии слоя буровой муки в забое. Мощность электродвигателя бура 0,5 л. с. Питание постоянным током обеспечивалось серебряно-цинковой батареей напряжением 24 В, рассчитанной на 40 мин непрерывной работы бура. При бурении возникал реактивный вращательный момент в 25 Н·м, который передавался на руки астронавта. Вес бура на Луне составлял 19,6 Н, и для повышения эффективности бурения астронавт должен был налегать на него своей тяжестью.

Из фотооборудования наибольший интерес представляла стереоскопическая камера для съемки грунта с близкого рас-

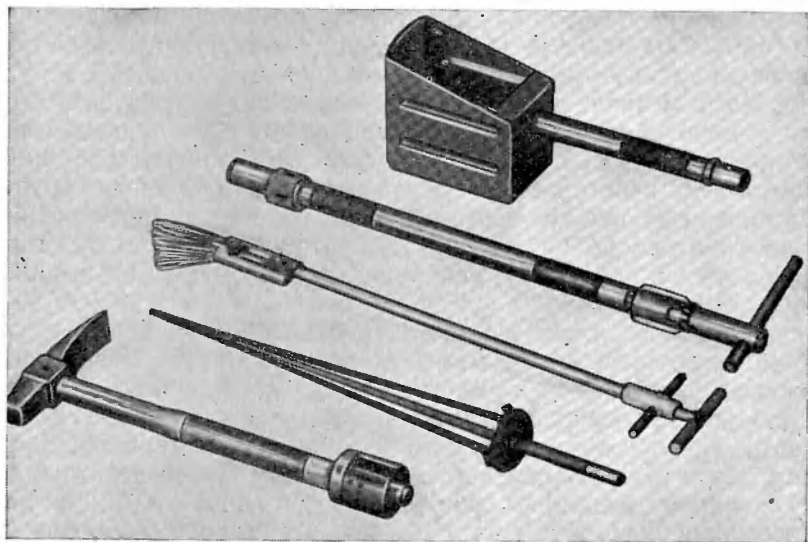


Рис. 5.3. Комплект геологических инструментов астронавтов

стояния с разрешением до 40 мкм. Размерам кадра 24×24 мм на поверхности грунта соответствовал участок размерами 76×76 мм.

В экспедиции «Аполлон-14» был использован простой ручной пенетрометр — алюминиевый анкеровочный штырь для научного оборудования. Длина его 68 см, диаметр 9,5 мм, нижний конец заточен на конус с углом при вершине 30° . Штырь был окрашен кольцами шириной в 2 см для визуальной оценки глубины погружения.

В экспедициях «Аполлон-15 и -16» применялся специальный пенетрометр с самописцем, который вычерчивал кривую зависимости глубины погружения от нагрузки. Этот пенетрометр имел сменные наконечники в виде двух конусов разных размеров и плоского прямоугольного штампа.

Экспедиции «Аполлон» доставили на Луну сейсмографы и геофоны, а также устройство для подрыва зарядов взрывчатых веществ на поверхности грунта. Используя методы сейсморазведки, с помощью этого оборудования были получены данные о строении горных пород на значительную глубину. Для этой же цели предназначалась радиоаппаратура, с помощью которой осуществлялись просвечивание верхней толщи грунта и определение параметров преломленных волн.

5.3. Наблюдения и измерения астронавтов на поверхности Луны

Выходя на поверхность Луны, участники лунных экспедиций передавали по радио свои наблюдения. По возвращении на Землю их подробно расспрашивали специалисты разных областей науки, в том числе и специалисты по механике грунтов. Астронавты ярко обрисовывали необыкновенные условия, в которых им приходилось двигаться и работать. Большой интерес представляли их непосредственные впечатления от лунного грунта, визуальная оценка его свойств и наблюдения при погружении в грунт грунтоносов, укреплении флагштока, движении по горизонтальным и наклонным участкам, преодолении рыхлых валов, окружающих кратеры (рис. 5.4).

Экипаж «Аполлона-11» высадился на плоской равнине, усеянной многочисленными мелкими кратерами. На поверхности лежало много камней и обломков скал крупностью до 80 см. Верхний слой (несколько сантиметров) грунта состоял из коричневатого-серого, слегка связного зернистого материала, крупность зерен которого соответствует мелкому или пылеватому песку. Зерна прилипали к обуви, подобно угольной пыли. При подбрасывании ногой все грунтовые частицы летели в одном направлении, с одинаковыми скоростями, на одинаковые расстояния. Передвигаться по поверхности Луны было легче, чем в на-

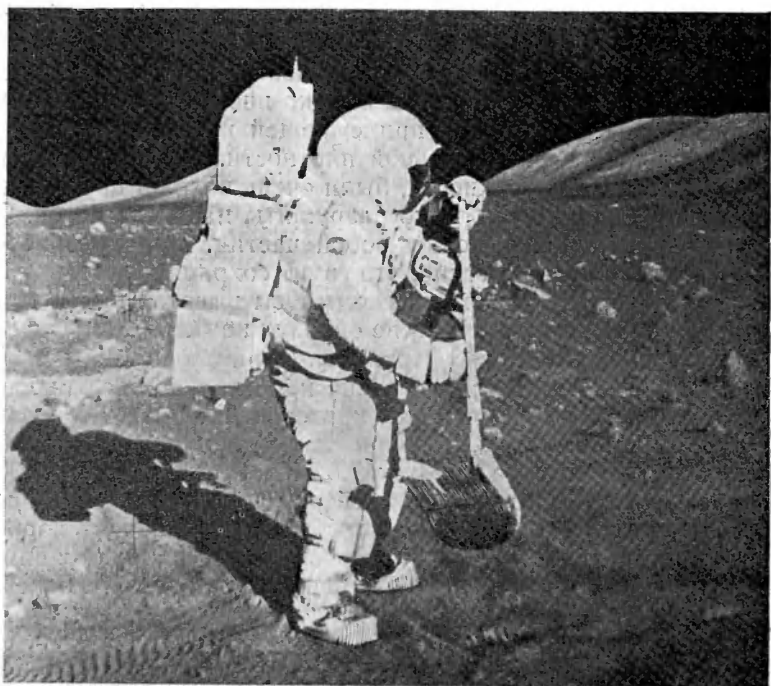


Рис. 5.4. Отбор пробы грунта на Луне

земных тренажерах, имитировавших лунную гравитацию. Астронавты пробовали разные способы передвижения, в том числе и прыжками с сомкнутыми ногами. Лучшим способом была признана обычная ходьба, при которой надо было все время наклоняться вперед вследствие неуравновешенности ранца с системой жизнеобеспечения.

По внешнему виду грунта трудно было оценить его несущую способность. Отмечалась совершенно неожиданная разница в глубине следов и рыхлости грунта в пунктах, мало отличающихся друг от друга на глаз. Возможно, что это было связано с разной толщиной рыхлого слоя. Под ногами грунт уплотнялся, образуя четкие отпечатки рельефных подошв. Местами происходило скольжение вбок. При наличии тонкого слоя зернистого грунта на поверхности скалы также возникала опасность скольжения.

По наблюдениям астронавтов, при забивке грунтоносов и установке флагштока грунт до глубины 10—12 см был рыхлым, но глубже более плотным, и флагшток удалось внедрить не более чем на 15—20 см. Грунтоносы были забиты геологическим молотком на глубину 20—23 см. После извлечения их из грунта

сохранились скважины с вертикальными стенками, но боковое сопротивление грунта было незначительным.

В большинстве случаев следы на поверхности возникали за счет уплотнения рыхлого грунта, однако иногда отмечались растрескивание и взбугривание прилегающей поверхности, что говорит о большой первоначальной плотности. Камни и комки, встречающиеся на поверхности, были очень похожи друг на друга, но комки можно было легко разрушить, наступив ногой. Они состояли из слипшихся между собой частиц. При разработке грунта ковшом было замечено, что грунт сохраняет острые кромки и может держать вертикальные откосы высотой более 10 см. Внутри ковша грунт крошится, не образуя комков.

Средняя глубина следа астронавта была около 1,25 см. Наибольшая (15—20 см) была отмечена при ходьбе по рыхлому грунту, из которого состоят валы кратеров. Глубина погружения опор лунной кабины (рис. 5.5) при статическом давлении от 0,56 до 1,41 Н/см² составляла от 2,5 до 7,5 см.

По наблюдениям астронавтов, сверху лежит слой серой пыли толщиной около 3 мм, дальше идет как бы спекшаяся корочка толщиной около 6 мм, которая растрескивается на расстоянии до 12,5—15 см от места приложения внешней нагрузки. Ниже ле-

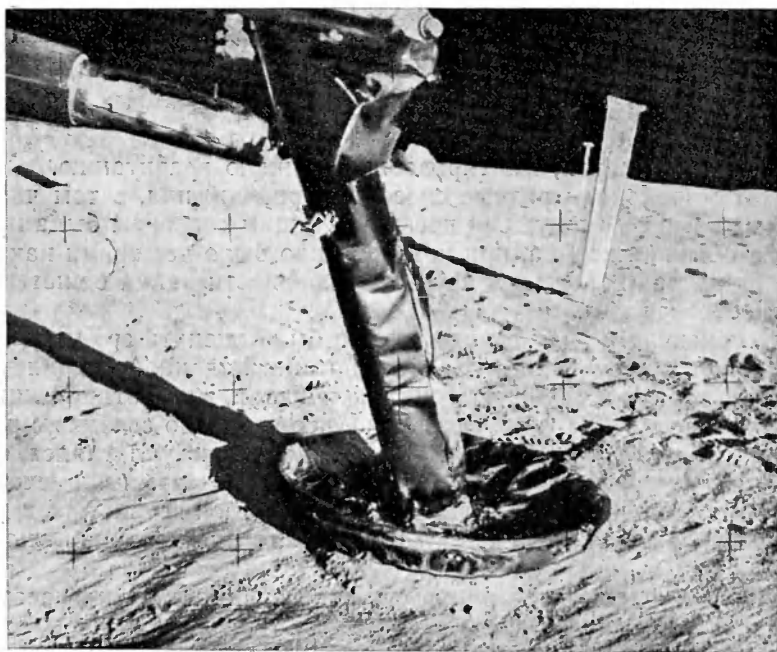


Рис. 5.5. Опора лунной кабины корабля «Аполлон» на поверхности Луны

жит слой мягкого темно-серого или коричневатого-серого, слегка связного, пылевато-песчаного грунта, способного держать естественный откос до 70°. Еще ниже этот грунт становится более плотным.

Экспедиция «Аполлона-12» была высажена примерно в 1,5 тыс. км от места посадки «Аполлона-11». Это типично морской район Луны, сходный по своему характеру с районом, где работала предыдущая экспедиция. Посадка была осуществлена в 300 м от станции «Сервейер-3», которая совершила посадку на 2,5 года раньше. Одно из заданий астронавтам состояло в розыске «Сервейера-3», освидетельствовании его состояния и демонтаже некоторых деталей.

Топография района посадки характеризуется мягким волнистым рельефом, наличием нескольких больших кратеров со смягченными очертаниями и большого числа меньших кратеров с приподнятыми валами. Грунт черный, пылевато-песчаный, с включением более крупных зерен. По поверхности рассеяны камни и обломки крупностью от нескольких сантиметров до нескольких метров, угловатой и округленной формы. Большинство из них частично углублено в слой зернистого грунта, в общем похожего на грунт в Море Спокойствия.

По оценке астронавтов, глубина пылеватого слоя значительно больше, чем в районе посадки «Аполлона-11». Ноги мстами глубоко погружались в пыль, и их приходилось высоко поднимать при ходьбе. Пыль налипала на скафандры, обувь и на все предметы, которыми пользовались астронавты. Попытки стряхнуть пыль со скафандра не привели к успеху. Астронавты часто передвигались прыжками длиной более 1 м. Один из них упал, но падение было настолько медленным, что не возникало опасности повреждения скафандра.

Астронавты занесли много запыленных предметов внутрь кабины и заметили, что после пребывания в атмосфере кислорода при давлении 3,5 Н/см² в течение нескольких дней пыль отстала от поверхности предметов.

Разработка грунта совком и отбор не представляли затруднений. Глубина внедрения флагштока составила около 17 см. Грунтонос был без затруднений погружен на глубину 35 см, а двойной грунтонос — на 70 см. После извлечения грунтоносов остались скважины с вертикальными стенками. Грунт вокруг скважин на поверхности не был деформирован. Твердые прослойки или обломки не встречались, и операции по извлечению грунтоносов не представляли труда.

Глубина следов астронавтов изменялась в широких пределах. Во многих случаях след образовывался только за счет уплотнения, но были случаи, когда рядом с ними наблюдалось взбугривание поверхности. На ровных участках глубина следа была около 1 см, на валах и склонах малых свежих кратеров значительно больше (5—8 см).

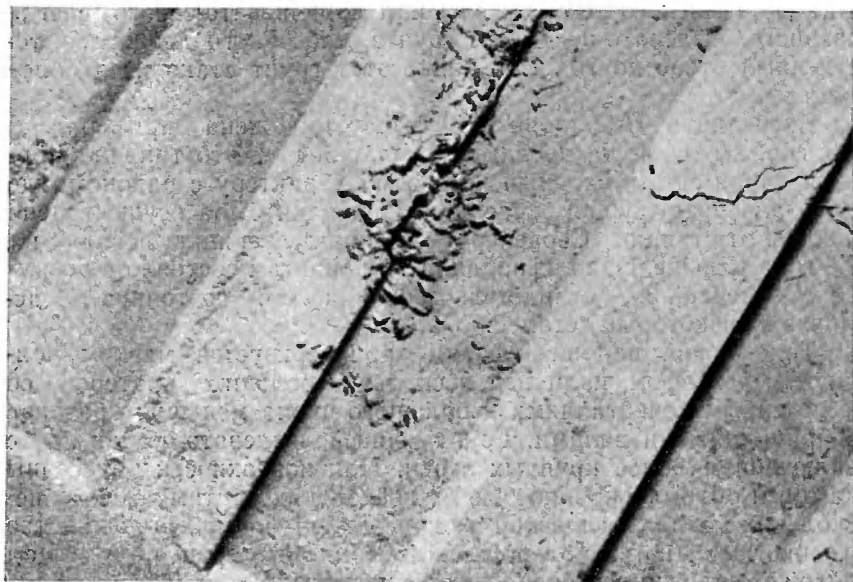


рис. 5.6. Часть отпечатка подошвы ботинка астронавта на лунном реголите крупным планом

Глубина погружения опор лунной кабины составляла от 5 до 7,5 см, а у одной из них достигала 10—12 см.

Астронавты выкопали траншейку глубиной 20 см с вертикальными стенками. Глубина траншейки ограничивалась только длиной рукоятки совка и могла бы быть значительно больше. Грунтонос, погруженный в дно траншеи, был легко вдавлен на 35 см. Грунт не создавал особых затруднений при движении астронавтов. Они не отмечали скольжения, как экипаж «Аполлона-11». Пересечение малых кратеров показало, что в них встречается более рыхлый грунт и следы получают более глубокими. В кратер с крутыми откосами астронавты не решились спуститься, так как заметили признаки оползней.

Астронавты обнаружили три участка в районе посадки, на которых свойства поверхностного грунта были различны. На одном из них грунт был особенно рыхлым, на втором — средней плотности, на третьем — более крупнозернистый и связный. Интересно, что в пределах последнего участка поверхность была покрыта мелкими ямками, как будто после выпадения дождя.

Крупномасштабный снимок следа астронавта показывает, что грунт очень хорошо уплотняется и благодаря мелкозернистому составу отлично воспроизводит рельеф подошвы (рис. 5.6).

Большой интерес представляет посещение членами экспедиции «Аполлон-12» места посадки станции «Сервейер-3» [59].

Профессор Р. Ф. Скотт рассказывает: «Во время первой экспедиции на Луну «Аполлона-11» я был в Хьюстоне и участвовал в оценке физических и механических свойств лунного грунта. Однажды меня спросили, что я думаю о посадке следующего корабля «Аполлон-12» в месте прилуновения станции «Сервейер-3» в апреле 1967 г. Я был в восторге от этого предложения, но скептически отнесся к возможности его осуществления на практике, поскольку было известно, что «Аполлон-11» опустился на Луну в нескольких милях от намеченной точки и пункт посадки удалось точно установить лишь после того, как были проявлены доставленные на Землю кинокадры о ходе прилуновения.

Семь лет назад я предложил специальный механизм — манипулятор для станций «Сервейер» — для изучения механических свойств лунных грунтов и участвовал в проведении экспериментов с ним на станциях «Сервейер-3 и -7».

Когда истек первый лунный день работы «Сервейера-3», не помню уж по каким соображениям, мы подняли ковш манипулятора в наиболее высокое положение. Именно это впоследствии позволило отделить ковш, так как астронавты в своих скафандрах не могут нагибаться до поверхности грунта. Как известно, по истечении лунной ночи «Сервейер-3» не откликнулся на сигналы с Земли и эксперимент с ним был завершен.

Тем временем было принято решение посадить корабль «Аполлон-12» в Океане Бурь в максимальной близости от станции «Сервейер-3», а астронавты Конрад и Бин получили задание осмотреть аппарат и демонтировать некоторые его детали для последующего изучения на Земле.

Корабль прилунился в 300 м от «Сервейера-3», и астронавты подошли к нему вплотную. Они сняли телевизионную камеру, кусок кабеля и другие детали, после чего Конрад неожиданно сообщил, что ему удалось демонтировать ковш манипулятора. Позже он рассказал, что попытка перекусить кусачками прочную стальную ленту, присоединенную к ковшу, была безуспешной, но затем лента сама переломилась в месте сварки. Астронавты уложили ковш в мешок из тефлона и доставили его на Землю.

После того как истек срок карантина, небольшая группа ученых и астронавтов собралась в лаборатории и вскрыла мешок. Во время экспериментов на Луне в 1967 г. на ковш налипла лунная пыль, часть ее осыпалась внутрь тефлонового мешка, поскольку при возвращении на Землю лунный вакуум не сохранился.

Если бы только я мог предположить, что вновь увижу ковш «Сервейера-3», я, конечно, оставил бы его после окончания эксперимента 1967 г. целиком заполненным грунтом. Теперь же вместе с ковшем вернулось всего 6,5 г.

Когда мешок был вскрыт, в воздухе распространился характерный запах лунной пыли. Армстронг и Олдрин характеризова-

ли его как запах гари или запах отстрелянного пистона. Я считая эту характеристику совершенно точной.

Осмотр показал, что, за исключением внешнего запыления, ковш сохранился в чрезвычайно хорошем состоянии. Несмотря на то, что для изучения доставленных на Землю деталей должно было понадобиться еще несколько месяцев, я испытывал чувство глубокого внутреннего удовлетворения: круг замкнулся» [59].

Экспедиция «Аполлон-14» высадились в районе Фра-Мауро на участке, который мог быть сложен материалами, выброшенными из Моря Дождей. Место посадки оказалось в широкой долине на склоне между кратерами Триплет и Дублет. Местность была покрыта огромным количеством кратеров. Грунт оказался исключительно мягким и мелкозернистым, напоминая порошок талька, окрашенный в коричневатый цвет. Камней крупнее 5 см было очень мало. На пылевом покрове виднелись маленькие ямки как бы от дождевых капель. Грунт местами был значительно крупнозернистее, чем в местах посадки «Аполлона-11 и -12», и отличался заметно меньшим сцеплением.

Астронавты начали рыть траншею для определения устойчивости откосов, которую предполагалось довести до глубины 60 см. Работу проводили на западной части кольцевого вала кратера диаметром 6 м и глубиной 0,68 м. Рытье велось мотыгой, насаженной под прямым углом к рукоятке. Астронавт доложил, что рыть легко, и первая выемка глубиной 15 см получилась с откосами крутизной 70—80°, при увеличении крутизны до 80—85° началось осыпание. По-видимому, откосы круче 60° были уже неустойчивыми. Рытье было прекращено при глубине 25—36 см, так как из-за осыпания стенок было невозможно достать чистый образец со дна траншеи.

При рытье были вскрыты следующие слои: верхний зернистый темно-коричневый толщиной 3—5 см и следующий за ним слой из черных стекловатых частиц толщиной 0,5 см или меньше. Ниже лежал более светлый крупнозернистый материал. Погружение грунтоносов проходило значительно труднее, чем в предыдущей экспедиции. Грунт плохо держался внутри грунтоносов и частично высыпался при их извлечении.

Экспедиция «Аполлон-15» работала в районе Апеннинских гор, у подножия горы Хэдли Дельта и трещины Хэдли. Осмотр местности показал, что одна из опор попала в углубление и погрузилась на 0,6 м. Толщина слоя пыли оказалась равной 15—30 см, т. е. значительно больше, чем в местах посадки первых экспедиций. На склоне около 10° астронавтам было трудно удерживать равновесие, и они не раз падали.

Передвигались астронавты на луноходе, который в глубоком слое пыли почти не буксовал, легко поднимался на склоны крутизной до 20° и прочно удерживался на них.

Астронавты вырыли траншею, стенки которой не осыпались. Трубка грунтоноса легко входила в грунт на глубину 30 см.

На глубине 40 см был встречен твердый грунт. Бурение скважин электробуром проходило легко до 2,0 м, затем была встречена твердая порода. Из скважины глубиной 2,4 м бур удалось вытянуть с большим трудом.

Освоившись с обстановкой, астронавты выработали новый «планирующий» стиль походки.

Сейсмометры, установленные астронавтами, показали, что скорость сейсмических волн, вызванных падением на Луну взлетного модуля корабля «Аполлон», резко возрастает начиная с глубины 25 км. Это позволяет полагать, что на Луне есть 25-километровый слой коры или мантии.

Экспедиция «Аполлон-16» исследовала район плоскогорья у кратера Декарт. Было проведено бурение на глубину до 2,7 м. Астронавты использовали луноход и усовершенствованные скафандры, обеспечивавшие им большую свободу движения. Участок посадки оказался загроможден большими обломками. Отмечалось очень большое количество пыли на окружающей местности. Когда один из астронавтов уронил прибор, поднялось такое облако пыли, как будто взорвалась бомба. Наличие камней ограничило скорость езды на луноходе до 6 км/ч. Но и при этом наблюдалась большая тряска, астронавтов засыпало пылью, а на машине произошли некоторые поломки. В этой экспедиции были найдены камни удивительно белого цвета.

Было подорвано 19 зарядов ВВ, а через месяц после отлета космонавтов по команде с Земли были выпущены гранаты из специально установленных гранатометов. Сейсмограммы, полученные при этом, показали, что рыхлый слой реголита может иметь толщину в 45 м. 13 мая 1972 г. на Луну упал большой метеорит, тротилловый эквивалент которого составлял 150 т. По данным сейсмографов толщина лунной коры в районе падения метеорита у кратера Фра-Мауро составляет 60 км, до глубины 960 км распространяется мантия, а ниже лежит ядро [74].

Последняя высадка американских космонавтов на Луну состоялась 7 декабря 1972 г. к юго-западу от кратера Литтров. Впервые в состав экипажа был включен ученый-геолог Х. Шмитт. Место прилунения «Аполлона-17» было выбрано в узкой ложине Тавр-Литтров в Море Спокойствия, изобилующей глубокими кратерами и горными хребтами. В этом районе предполагалось обнаружить темные грунты на поверхности и некоторые горные породы, представляющие особый интерес для селенологов. Движение по поверхности Луны осуществлялось на луноходе того же типа, что и ранее. Были предусмотрены бурение на глубину до 3 м с отбором кернов и сейсмические эксперименты.

При движении по Луне пешком и на луноходе поднималось очень много пыли, которая попадала в механизмы лунохода и вызывала запыление объектива телекамеры. Космонавты часто падали, и их белые скафандры покрылись серой лунной пылью. От абразивного действия пыли у Шмитта начали протираться

перчатки и стерся слой резины на рукоятке геологического молотка.

У кратера Шорти космонавты обнаружили участки, покрытые грунтом оранжевого цвета. Толщина цветного слоя оказалась равной 5—8 см. Первоначально предположили, что этот грунт имеет вулканическое происхождение и даже является результатом процессов фумарольного типа. Все это привело к мнению об ударном происхождении оранжевого грунта, который является, по-видимому, продуктом расплава поверхностного слоя лунной коры при ударе метеорита и обогащения расплавленного вещества элементами метеоритного происхождения [75].

Однако анализ грунта в земной лаборатории показал, что он на 90% состоит из стеклянных шариков крупностью в среднем не более 0,04 мм и менее 5% составляют обломки горных пород. Шарiki отличаются большой плотностью, повышенным содержанием титана, низким содержанием алюминия и большим количеством магматических минералов. Признаков воды найдено не было.

5.4. Оценка свойств реголита по результатам исследований астронавтов

След ботинка астронавта был длиной 33 см, шириной 14 см и площадью 410 см². При весе астронавта на Луне вместе со снаряжением 292 Н среднее давление под подошвой равно 0,7 Н/см². Путем наземных испытаний с аналогом лунного грунта американские ученые установили, что при глубине следа 1 см пористость грунта составляет около 45%, а при глубине в 10 см увеличивается до 54%.

Обработка данных, которые сообщили астронавты экспедиций «Аполлон-11, -12, -14 и -15», показала, что пористость поверхностного слоя реголита колеблется от 32 до 58%. Следовательно, реголит в разных точках находится в разном состоянии — от плотного до рыхлого.

Модуль общей деформации при глубине следа в 1 см равен $E_0 = 13,5 \text{ Н/см}^2$, а при глубине в 10 см $E_0 = 1,3 \text{ Н/см}^2$.

Средний диаметр следа опоры корабля «Аполлон» составил 63 см, а статическая нагрузка на опору — 2700 Н. Глубина вдавливания опор изменялась от 2,5 до 7,5 см, что приводит к значениям модуля общей деформации в пределах 5,5—16,5 Н/см². Статическая несущая способность при таких глубинах составила около 0,9 Н/см².

Астронавты экспедиции «Аполлон-14» использовали ручную тележку, вес которой на Луне в зависимости от нагрузки изменялся от 87 до 127 Н. Глубина колеи от ее колес изменялась от 0,5 до 2 см, причем наибольшая колея образовывалась в мягком грунте кольцевых валов кратеров.

В той же экспедиции проводились опыты по глубокой пенетрации грунта с помощью специально приспособленного анкеро-вочного штыря. Индентор пенетрометра конический с углом при вершине 30° , диаметр конуса у основания 0,95 см, длина штыря 68 см. Рукоятка — в верхней части. Штырь окрашен кольцами через каждые 2 см по высоте. Нагружение производилось усилием астронавта вручную, без силоизмерительного прибора.

Еще до полета на Луну в лаборатории при лунном ускорении силы тяжести было определено усилие, которое может развить астронавт, нажимая на рукоятку пенетрометра сначала одной рукой, а затем двумя. Оказалось, что одной рукой он передает силу от 70 до 130 Н, а двумя — до 220 Н.

На Луне было проведено три опыта с пенетрометром, при которых сначала штырь вдавливали одной рукой, насколько это было возможно, и промежуточную глубину погружения записывали, а затем дожимали двумя руками до отказа. Была достигнута глубина погружения 62 и 68 см. Она лимитировалась только длиной штыря, так как у астронавтов не возникало ощущения упора индентора в твердый подстилающий слой.

При обработке результатов опыта была использована формула Мейергофа [72] для вычисления лобового сопротивления вдавливанию конуса в зависимости от объемного веса грунта, его угла внутреннего трения и сцепления. Сопротивление по боковой поверхности штыря было принято равным 0,3% лобового сопротивления, отнесенного к единице площади.

Приняв плотность грунта равной $1,8 \text{ г/см}^3$, авторы исследования получили следующие вероятные значения параметров сопротивления сдвигу:

$$c \approx 0,034 \div 0,060 \text{ Н/см}^2, \quad \varphi \approx 35 \div 36^\circ.$$

Несмотря на очевидную грубость методики и приближенный метод обработки результатов опыта, полученные данные не противоречат результатам определений, проведенных ранее на Луне станциями «Сервейер-3 и -7».

Результаты пенетрации и наблюдений за деформацией поверхности грунта под нагрузкой были обработаны с использованием теории взаимодействия пневмошин с мягким грунтом и зависимости между пористостью грунта и сопротивлением пенетрации. На основании этой обработки американские ученые получили данные, представленные в табл. 5.2.

Отбор проб реголита для определения плотности проводился трубчатыми грунтоносами. Грунтоносы вдавливались в грунт вручную или их забивали геологическим молотком.

На рис. 5.7 представлены сечения наконечников грунтоносов «Аполлона-11 и -12». Форма наконечника грунтоноса «Аполлона-11» представляется явно неудовлетворительной. Его внутреннее сечение на входе имеет площадь $6,7 \text{ см}^2$, а при переходе к цилиндрической части — всего 3 см^2 . Вследствие этого очень

Таблица 5.2

Свойства поверхностного слоя грунта по данным экспедиции
«Аполлон-14»

Тип поверхности	Коэффициент пористости ε	Плотность реголита γ , г/см ³	Угол внутреннего трения φ , град
Кратеры с очень мягкими очертаниями			
Ровная	0,68—0,70	1,85—1,81	43,4—41,0
Плотная	0,69	1,84	42,8
Мягкие участки	0,74—0,75	1,79—1,77	39,6—38,5
Края кратера	0,74	1,78	39,0
Кратеры со среднесмягченными очертаниями			
Ровная	0,62—0,71	1,91—1,81	47,1—41,0
Плотная	0,68	1,85	43,2
Мягкие участки	0,71—0,77	1,81—1,75	41,0—37,2
Края кратера	0,75	1,77	38,5
Кратеры с резкими очертаниями			
Ровная	0,68—0,74	1,85—1,70	43,4—39,6
Плотная	0,70	1,83	42,1
Мягкие участки	0,71—0,77	1,81—1,75	41,0—37,4
Края кратера	0,74	1,78	39,4

Примечание. Плотность реголита γ вычислена исходя из плотности базальта $\rho_{уд}=3,1$ г/см³; более точны значения, вычисленные исходя из плотности, определенной на образцах, доставленных «Аполлоном-14»: $\rho=2,95$ г/см³, т. е. на 5% ниже. Значения углов внутреннего трения, полученные косвенным путем, представляются также завышенными.

пористый грунт таким грунтоносом может быть уплотнен почти вдвое, а плотный грунт разрыхлен. Данные о плотности лунного грунта, полученные экспедицией «Аполлон-11», нельзя считать надежными.

Наконечник грунтоноса «Аполлона-12» далек от совершенства, так как его стенки слишком толстые. Степень нарушения естественной плотности образца, отбираемого грунтоносом с толстыми стенками, зависит от соотношения между ее наружным и внутренним диаметрами. С этой точки зрения грунтонос «Аполлона-12» является также неудовлетворительным.

Грунтоносы «Аполлона-11 и -12» ни разу не удалось целиком наполнить грунтом. Наполнение колебалось от 47 до 61%, причем эти цифры не очень достоверны.

Грунтоносы «Аполлона-15 и -16» имели внутренний диаметр 4,13 см и наружный 4,39 см. Электробур имел внутренний диаметр 2,04 см.

Результаты определения объемного веса грунтов, отобранных грунтоносами, приводятся в главе 6.

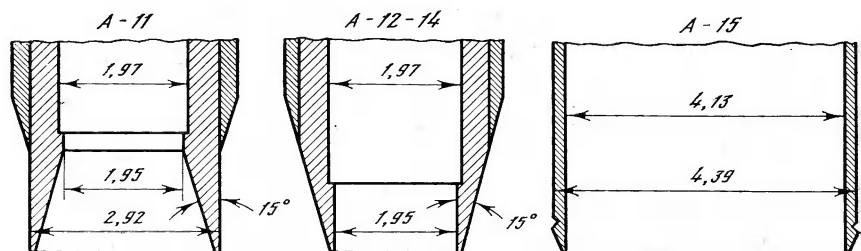
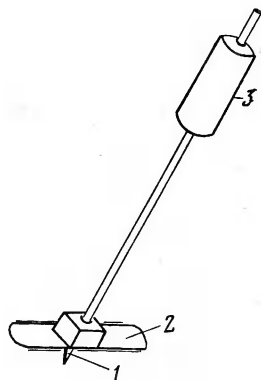


Рис. 5.7. Схемы нижних частей трубчатых грунтоносов экспедиций «Аполлон-11, -12, -14, -15» (А-11; А-12, А-14; А-15)

Размеры даны в см

Рис. 5.8. Пенетрометр экспедиций «Аполлон-15, -16»

- 1 — конус;
2 — плита;
3 — самописец



В экспедиции «Аполлон-15» был впервые использован специально для нее разработанный самопишущий пенетрометр (рис. 5.8). Прибор имеет опорную плиту, которая устанавливается на поверхность грунта и служит базой для отсчета глубины погружения индентора. Сквозь нее проходит вертикальный шток, на нижнем конце которого можно укрепить конический индентор с углом при вершине 30° и площадью основания в 1,29; 3,22; или 6,45 см^2 , а также прямоугольный штамп размерами $2,54 \times 12,7$ см. Основным был индентор в виде конуса с площадью основания 3,22 см^2 . Глубина погружения может достигать 76 см, максимальное усилие 111 Н. Вес прибора на Земле 23 Н. В верхней части прибора укреплен механизм, который записывает кривую зависимости между усилием, передаваемым на конус, и глубиной его погружения. Такой же прибор использовался в экспедиции «Аполлон-16». На основании опытов с пенетрометром были установлены следующие характеристики реголита:

Коэффициент пористости ε	0,54—0,61
Плотность ρ , г/см^3	1,92—2,01
Угол внутреннего трения φ , град	47,5—51,5

Эти данные относятся к верхнему слою реголита на глубинах от 10 до 20 см. Они вызвали удивление слишком высокими

Таблица 5.3

Механические характеристики грунта по данным экспедиции «Аполлон-16»

Номер участка и опыта	Плотность ρ , г/см ³	Угол внутреннего трения ϕ , град	Сцепление c , Н/см ²
4—1	1,89	46,5	0,060
10—2	1,96	49,5	0,037
10—3	1,93	47—50	0,060—0,025

значениями плотности и внутреннего трения и требуют уточнения.

Такой же пенетромтр был применен в экспедиции «Аполлон-16», но максимальное усилие можно было увеличить до 215 Н. Опыты проводились на трех разных участках и дали результаты, представленные в табл. 5.3.

В ходе экспедиции «Аполлон-17» было проведено много наблюдений над крупными обломками скал и оставленными ими следами на склонах, сложенных реголитом. При этом использовался метод вычисления угла внутреннего трения, разработанный по специальному заданию НАСА [71]. Исходными данными служили: уклон поверхности, крупность обломка и глубина следа. Плотность обломка принимали равной 3,2 г/см³, плотность реголита — 1,6 г/см³, форму обломка — сферической, сцепление реголита — 0,1 Н/см². Расчеты показали, что в среднем по 25 наблюдениям $\phi = 37,3^\circ$. Стандартное отклонение равно $5,6^\circ$ и вызывается локальными изменениями свойств грунта. Отметим, что в этих наблюдениях фигурировали обломки крупностью от 2 до 20 м и следы в грунте шириной от 1,5 до 16 м.

В предварительном отчете экспедиции «Аполлон-17» приводятся также данные определения пористости реголита по глубине следа ботинка астронавта, причем были использованы наблюдения, сделанные всеми экспедициями «Аполлон». Оказалось, что в среднем пористость грунта между кратерами равна 44% при стандартном отклонении 2,7%, а на кольцевых валах кратеров — соответственно 46,5 и 4,3%. Глубина следов лежала в пределах от 0,1 до 10 см, средняя пористость — от 42,8 до 46,5%.

В экспедиции «Аполлон-17» большое внимание было уделено взаимодействию колес лунохода с грунтом и на основе разработанной в США теории движения колесных машин по грунту были вычислены параметры, характеризующие грунт. Затем та же методика была применена к результатам наблюдений за движением ручной тележки экспедиций «Аполлон-14», советского «Лунохода-1» и луноходов экспедиций «Аполлон-15, -16». В конечном счете были получены следующие данные, характери-

Таблица 5.4

Коэффициент пористости и угол внутреннего трения по данным [71]

Состояние грунта	Коэффициент пористости ε	Угол внутреннего трения φ , град, при испытании на	
		стабилометре	ребристом штампе
Плотный	0,64—0,75	39,5—42	37—38,5
Рыхлый	0,89	38	36

зующие лунный реголит во всех перечисленных экспериментах (табл. 5.4).

Таким образом, американские ученые пришли к выводу, что механические свойства поверхностного слоя грунта Луны примерно одинаковы повсеместно и не зависят от его происхождения, геологической истории, химического состава и местных особенностей окружения. Этот вывод подтверждается анализом глубин следов астронавтов в разных местах Луны и данными о потреблении энергии при движении луноходов. Главным фактором, влияющим на проходимость лунного реголита, является коэффициент пористости.

5.5. Результаты изучения внутреннего строения Луны методами сейсморазведки

Структура Луны в местах посадки станций «Аполлон-14—17» была выявлена методами сейсморазведки.

Четыре сейсмические станции, установленные на Луне экспедициями «Аполлон», зарегистрировали с 1969 по 1978 г. несколько тысяч лунотрясений и тектонических толчков, а также десятки ударов метеоритов и отработанных модулей космических аппаратов. Проводились и активные сейсмические эксперименты, при которых толчки создавались с помощью зарядов взрывчатых веществ. В книге В. Н. Жаркова [9] приводятся в сжатой форме следующие результаты этих исследований и выводы из них, сделанные американскими сейсмологами Р. Ковачем и Г. Латемом.

Поверхность Луны покрыта раздробленным слабосвязным слоем реголита, средняя толщина которого колеблется около 10 м. Под реголитом лежит слой толщиной от десятков до сотен метров. Здесь скорость продольных волн $v_p \approx 250 \div 300$ м/с. Этот слой состоит из трещиноватого базальтового материала. Ниже лежит слой трещиноватого базальта с включениями, отличающимися низкой скоростью прохождения сейсмических волн. Скорость продольных волн в этом слое равна $v_p = 104$ м/с, попереч-

ных $v_s = 62$ м/с. На глубине 250 м находится граница перехода к более плотному базальтовому слою толщиной около 1 м. Здесь $v_p \approx 1,2$ км/с.

Лунные морские базальты идут до глубины 20 км. Под ними лежит слой габбро-анортозитов, нижняя граница которого в районе Фра-Мауро находится на глубине 60 км. На этом основании средняя толщина лунной коры условно принята также

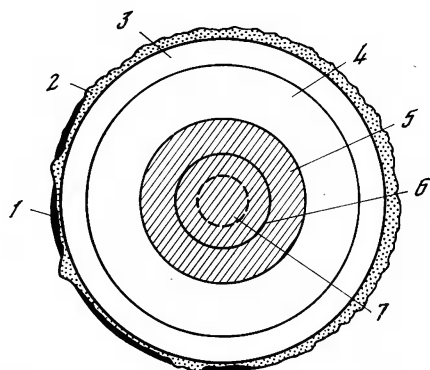


Рис. 5.9. Схема внутреннего строения Луны

- 1 — лунные моря;
- 2 — континенты;
- 3 — верхняя мантия;
- 4 — средняя мантия;
- 5 — астеносфера;
- 6 — частично расплавленная нижняя мантия;
- 7 — ядро

равной 60 км. Однако на невидимой с Земли стороне Луны она может достигать и 100 км. Во всяком случае, для Луны характерна большая мощность коры, отличающая ее от Земли.

Под корой расположена верхняя мантия Луны толщиной 250 км; вероятный состав ее пироксено-оливиновый. Средняя мантия расположена на глубинах порядка 300—800 км. Состав ее близок к первичному веществу, из которого образовалась Луна. Кора, верхняя и средняя мантии образуют жесткую литосферу.

На глубине около 1000 км расположена лунная астеносфера, в которой вещество находится в состоянии частичного расплавления и отличается пластичностью. Луна может иметь маленькое ядро в расплавленном или полурасплавленном состоянии, состоящее из раствора Fe—FeS.

Лунотрясения исключительно слабы, и полное выделение сейсмической энергии за год на Луне на 12—10 порядков ниже, чем на Земле. Фокальные зоны лунотрясений расположены в пограничной зоне между литосферой и астеносферой. Именно там должны концентрироваться внутренние напряжения, возникающие из-за неравновесности фигуры Луны. Сейсмичность Луны отличается периодичностью, совпадающей с периодичностью лунных приливов. Возможно, что лунные приливы служат спусковым механизмом для лунотрясений или же источником их энергии. На рис. 5.9 показана схема внутреннего строения Луны, соответствующая описанным выше представлениям.

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛУННЫХ ГРУНТОВ НА ЗЕМЛЕ

6.1. Приемные камеры и установки для определения физико-механических свойств

Лабораторные исследования образцов лунных грунтов, доставленных автоматическими станциями «Луна-16, -20, -24» в СССР и экспедициями «Аполлон» в США, проводились в специально оборудованных приемных камерах, лабораториях и вакуум-камерах разного назначения.

В СССР эти исследования велись под общим руководством академика А. П. Виноградова В. В. Громовым, В. В. Маркачевым, А. А. Силиным, Ю. А. Сурковым, К. П. Флоренским, В. В. Шандором и другими учеными при участии авторов книги [77—89]. В США аналогичные работы проводили Л. Д. Джаффе, В. Д. Кэрьер, Дж. К. Митчел, Р. Ф. Скотт и др. [57, 59], 73, 90].

В Советском Союзе прием и вскрытие контейнеров с образцами лунных грунтов проводились в Центральной приемной лаборатории Академии наук СССР. Исследования их механических и некоторых физических свойств велись в приемной камере, герметичном боксе универсальной испытательной установки ТОР-1 и вакуум-камерах специального назначения.

Приемная камера позволяла в среде, исключаящей взаимодействие лунного грунта с компонентами земной атмосферы, вскрыть контейнеры, провести осмотр и первичное изучение пробы грунта, а также расфасовку для дальнейших всесторонних исследований, включающих и изучение его физико-механических свойств [78].

Основными ее элементами являются рабочая камера, шлюзовое устройство, система откачки и напуска инертного газа. Рабочая камера изготовлена из нержавеющей стали и имеет цилиндрическую форму. Ее диаметр 1,2 м, длина 1,6 м. Внутри камеры помещаются приспособления и инструменты для вскрытия контейнеров и работы с веществом, расфасовочные контейнеры, весы, датчики и приборы. Для детального осмотра вещества и рабочей камеры имеется столик, который может быть подведен к смотровому окну. Рабочая камера имеет несколько смотровых окон из оптического стекла с осветителями для исследования вещества с помощью оптических приборов.

Камера (рис. 6.1) спроектирована применительно к следующему порядку работы. Контейнер с веществом вводится через шлюзовое устройство в рабочую камеру, заполненную гелием высокой чистоты. Гелий выбран как газ, минимально взаимодействующий с веществом. Перед заполнением гелием внутренние поверхности камеры стерилизуются перекисью водорода для уничтожения земных микроорганизмов. В камере создается вакуум до давления 10^{-5} — 10^{-6} мм рт. ст.

Работа в камере ведется оператором с помощью устройств, смонтированных на цилиндрической части камеры. Работа в перчатках возможна лишь тогда, когда камера заполнена газом до атмосферного давления.

Шлюзовое устройство предназначено для передачи инструментов, приспособлений, контейнеров из атмосферы в камеру и обратно без нарушения созданных в ней условий. Элемент, вводимый в рабочую камеру, помещается в шлюзовое устройство через затвор. Затем затвор герметизируется и шлюзовая камера откачивается. Далее шлюз заполняется гелием, после чего открывается другой затвор, разделяющий шлюзовую и рабочую камеры. Предварительная откачка установки осуществляется вакуумным агрегатом с механическим двухроторным насосом. В линии предварительного разрежения установлен термостерилизатор для уничтожения микроорганизмов, которые, как предполагали, могли присутствовать в газах, содержащихся в лунном грунте. Рабочая температура термостерилизатора 800°C .

Для высоковакуумной откачки на установке применены турбомолекулярные и магниторазрядные насосы. Предельный вакуум, достигаемый в камере, $2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.

Лунный грунт, доставленный «Луной-16 и -20», находился в буровом снаряде, который представляет собой пустотелую трубу с винтовой нарезкой и резцами на торце. Буровой снаряд заключен в герметичный контейнер.

С помощью специальных приспособлений контейнер был вскрыт и из него извлечен буровой снаряд. Затем лунный грунт взвешивался и с величайшей осторожностью помещался на лоток (рис. 6.2). После этого проводились его детальный осмотр, фотографирование, изучался характер изменения колонки образца по глубине.

После первичного осмотра колонки в приемной установке были отобраны образцы грунта для первичного изучения в герметичном исследовательском боксе приемной камеры, а также для детальных исследований. Образцы грунта, передаваемые для дальнейшего изучения, помещались в расфасовочные контейнеры, которые через шлюз вынимались из приемной камеры и вскрывались перед началом дальнейших исследований. Следует отметить, что большая часть грунта после завершения исследований была возвращена в приемную камеру на длительное хранение.

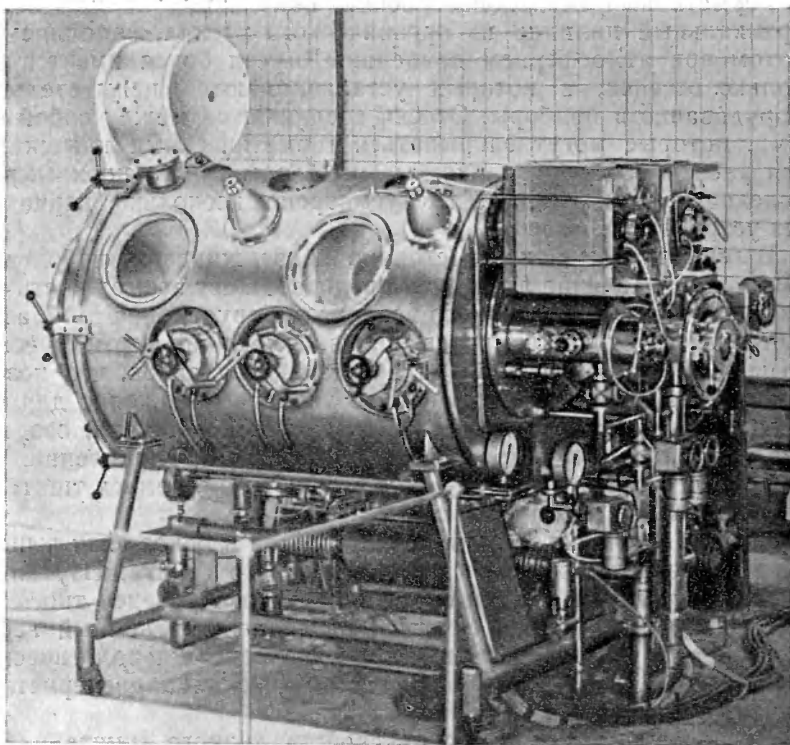


Рис. 6.1. Внешний вид камеры АН СССР для приема лунного грунта

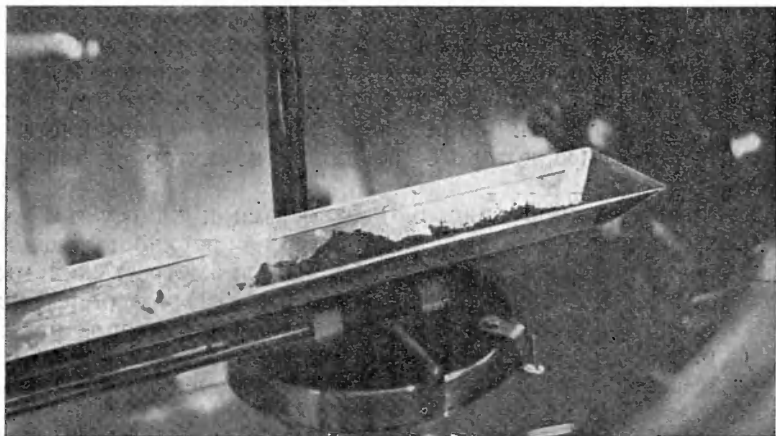


Рис. 6.2. Лунный грунт, доставленный «Луной-20» в лотке приемной камеры

Герметичный исследовательский бокс представляет собой вертикальный цилиндр из органического стекла, заполняемый азотом при атмосферном давлении. Внутри бокса имеется несколько отсеков, в которых устанавливаются испытательное оборудование и приборы. Отсеки соединяются между собой окнами, которые могут закрываться герметическими крышками. Для работы с оборудованием и приборами, размещенными в исследовательском боксе, предусмотрено несколько перчаточных устройств.

В герметичном боксе постоянно поддерживается небольшое избыточное давление азота, что предотвращает возможность затекания внутрь атмосферного воздуха. Оборудование и образцы грунта вносятся в бокс через шлюз, имеющий герметические крышки. Бокс расположен на вращающейся опоре, что позволяет устанавливать его в наиболее удобное положение для работы операторов. Сверху бокса находятся осветители, создающие регулируемый световой поток в заданном направлении.

Все приборы перед внесением в бокс подвергались тщательной обмывке и стерилизации.

Помимо изучения механических свойств в боксе, был выполнен комплекс других исследований лунного грунта. Изучались морфология и типы частиц образцов грунта. Проведен тщательный гранулометрический анализ, определены объемный вес и пористость грунта. Начаты петрологические и минералогические исследования. Здесь же получены оптические характеристики грунта.

Исследования механических свойств лунного грунта в герметичном боксе построены на прямых измерениях его характеристик методами, принятыми в механике грунтов. Для этого применялись специально разработанные приборы, позволяющие проводить исследования на малых навесках, а также исключающие возможность загрязнения грунта посторонними примесями. При исследовании использовались сдвиговый прибор СПГЛ-1 для определения сжимаемости и сопротивления грунта сдвигу, микропенетрометр для определения несущей способности и прибор, с помощью которого изучался характер деформации грунта [83].

Сдвиговый прибор (рис. 6.3) относится к классу приборов одноплоскостного среза с фиксированной поверхностью сдвига. В этом приборе испытываются образцы диаметром 25,2 мм и высотой 9—12 мм. Микропенетрометр (рис. 6.4) позволяет определить сопротивление вдавливанию в грунт инденторов различной формы. В приборе для изучения характера деформации сдвига имеется подвижная перегородка, передвигая которую можно визуально наблюдать через прозрачные стенки прибора деформацию грунта при выпирании и обрушении.

Универсальная испытательная установка ТОР-1 (рис. 6.5) представляет собой вакуум-камеру, внутри которой размещен

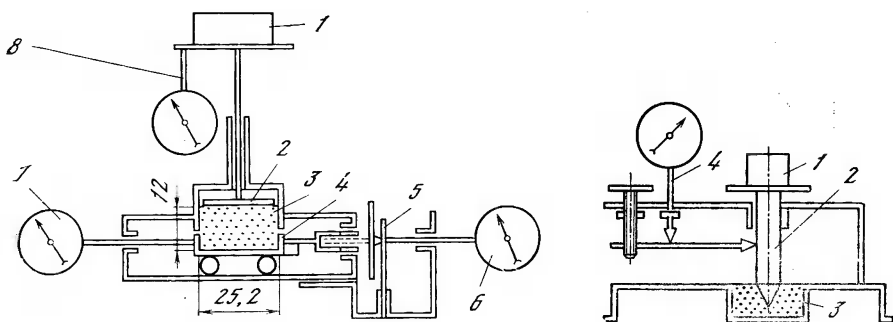


Рис. 6.3. Схема сдвигового прибора СПГЛ-1

1 — нагрузка; 2 — штамп; 3 — образец грунта; 4 — подвижная каретка; 5 — упругая балка; 6 — индикатор величины сдвига; 7, 8 — индикаторы горизонтальной и вертикальной деформации соответственно

Размеры даны в мм

Рис. 6.4. Схема микропенетromетра

1 — нагрузка; 2 — шток пенетromетра; 3 — образец грунта; 4 — индикатор вертикальной деформации

комплекс механизмов с измерительными узлами, предназначенный для различных исследований лунного грунта и его аналогов [85].

Измерительные механизмы ТОР-1 (рис. 6.6) позволяют достаточно просто и удобно в короткие сроки определять большой комплекс механических характеристик, в том числе сопротивление пенетрации, коэффициент сжимаемости, сопротивление сдвигу, коэффициенты внешнего трения, абразивность и такие физические характеристики, как теплоемкость, теплопроводность, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, удельное электрическое сопротивление.

Установка ТОР-1 позволяет проводить испытания только с весьма малыми пробами зернистого грунта и твердой горной породы, так как из-за условий обеспечения вакуума в камере масса образцов грунта не может превышать 5 г. Это ее недостаток. Однако возможность поддерживать одинаковую среду при различных видах испытаний делает установку чрезвычайно удобной для моделирования лунных условий, так как показатели, характеризующие вакуумные условия, остаются неизменными при переходе от одних испытаний к другим. Это обеспечивает комплексность исследований и существенно облегчает сравнение отдельных характеристик и установление зависимостей между ними. На ТОР-1 можно проводить испытания в атмосфере воздуха при нормальном давлении, в атмосфере стерилизованного гелия высокой чистоты и в вакууме глубины

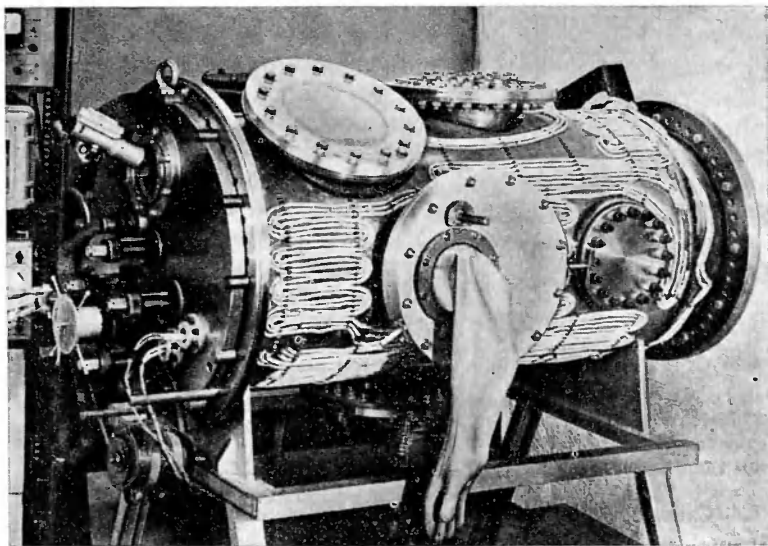


Рис. 6.5. Общий вид испытательной универсальной вакуумной установки TOP-1

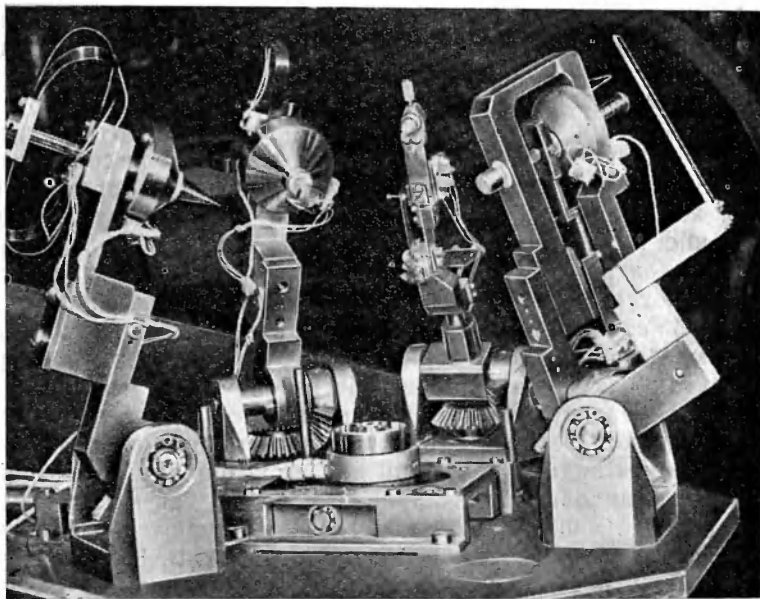


Рис. 6.6. Измерительные узлы установки TOP-1

до 10^{-5} мм рт. ст. Температура образца может быть установлена от 20°C (без подогрева) до 140°C (с подогревом).

При проведении опытов в нормальных атмосферных условиях камеру не герметизировали и не откачивали. Опыты в атмосфере гелия выполнялись при предварительной юткатке камеры до вакуума $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. и заполнении ее гелием. При проведении опытов в вакууме откачка достигала $(2-5) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. В опытах с подогревом образец подогревали до начала откачки, чтобы удалить влагу.

Лунный грунт на испытания поступал в герметичном контейнере, где он находился в атмосфере чистого гелия. Земные аналоги лунного грунта поступали в открытом виде. Вследствие этого в аналогах присутствовала гигроскопическая влага в количестве 1,5—3,0% по весу. При юткатке TOP-1 эта влага испарялась, и последующие испытания в атмосфере гелия в вакууме проводились на сухих материалах. Опыт работы с TOP-1 показал, что в присутствии грунтов откачку необходимо вести медленно, так как быстрое падение давления в камере приводит к их вспучиванию под действием расширения газа в порах и парообразования за счет испарения гигроскопической влаги.

Образец грунта помещается в центральной части приборной плиты TOP-1 внутри цилиндрической чашечки диаметром 11,3 мм. Чашечка оборудована электронагревателем. При проведении опытов на пенетрацию и компрессию чашечка неподвижна. При опытах на вращательный сдвиг она поворачивается вокруг вертикальной оси.

Отдельные измерительные узлы с рабочими органами и устройством для приложения нагрузки, измерения нагрузки и деформаций смонтированы на консольных балках, которые могут поворачиваться в вертикальной плоскости и подводить рабочие органы к поверхности изучаемого грунта. Движение консолей вниз ограничивается жесткими упорами, которые гарантируют точную установку рабочих органов [84].

Приложение вертикальной нагрузки осуществляется с помощью нажимной балки, которая также поворачивается в вертикальной плоскости и, входя в контакт с головкой нагружаемого штока того или иного узла, опускает его вниз.

Рабочим органом узла пенетрации (рис. 6.7) служит полированный конус 1 с углом при вершине 30° . Конус весит 200 Н. Внедрение конуса в поверхность образца 2, помещенного в чашечке 3, осуществляется под действием его собственного веса. Конус укреплен на мембране 4, которая свободно лежит на кольцевом упоре внутри головки узла 5. На мембране наклеен тензодатчик типа ФКП, который измеряет силу, передающуюся от конуса мембране. В исходном положении вес конуса передается на мембрану. В процессе эксперимента нажимная балка, смонтированная на отдельном поворотном рычаге, перемещает конус вниз до поверхности образца. Фиксируется ну-

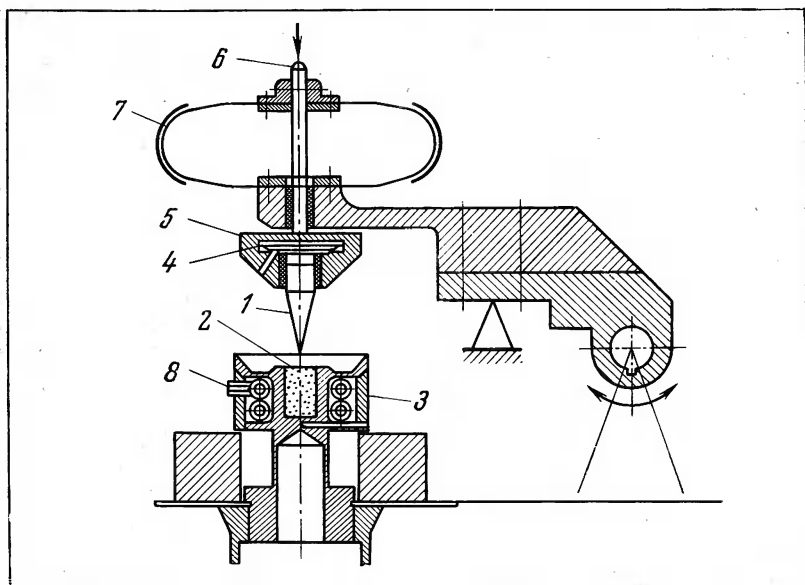


Рис. 6.7. Измерительный узел для проведения опытов с пенетрацией

1 — полированный конус; 2 — образец грунта; 3 — чашечка; 4 — мембрана; 5 — головка; 6 — шток пенетromетра; 7 — эллиптическая пружина; 8 — нагреватель

левой отсчет. При дальнейшем медленном движении конус входит в контакт с грунтом. Постепенно весь вес передается на грунт, а измерительная мембрана полностью разгружается, о чем говорят показания датчика. Глубина погружения конуса определяется по вертикальному перемещению штока 6 с помощью эллиптической пружины 7 с наклеенными на ней тензодатчиками типа ФКП. Максимальная глубина погружения 1,8 см. Образец в чашечке может быть подогрет нагревателем 8.

Рабочим органом компрессионного узла (рис. 6.8) служит полированный поршень 1 с плоским основанием диаметром 11 мм, приложенным к поверхности образца 2. Поршень укреплен на мембране 4 с наклеенным на нее тензодатчиком типа ФКП. Мембрана укреплена на кольцевом упоре внутри головки 3. Вертикальное перемещение головки осуществляется путем воздействия нажимной балки на вершину штока 5. При этом мембрана нажимает на поршень и заставляет его вдавливать в поверхность образца. Усилие вдавливания измеряется тензодатчиком мембраны, а перемещение поршня — эллиптической пружины 6 с тензодатчиками типа ФКП. Образец может быть подогрет нагревателем 7. Вертикальное давление на грунт может изменяться от 0 до 15 Н/см², глубина погружения поршня — от 0 до 0,8 см.

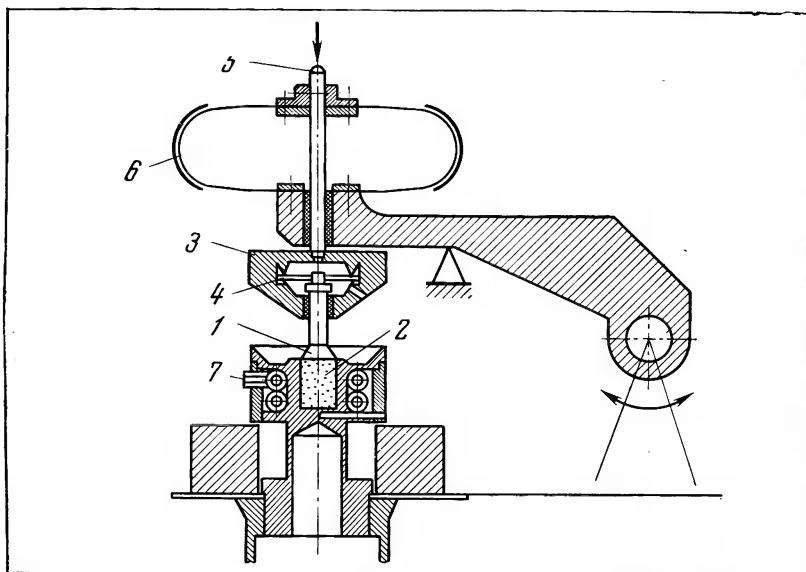


Рис. 6.8. Компрессионный измерительный узел

1 — поршень; 2 — образец грунта; 3 — головка; 4 — мембрана; 5 — шток; 6 — эллиптическая пружина; 7 — нагреватель

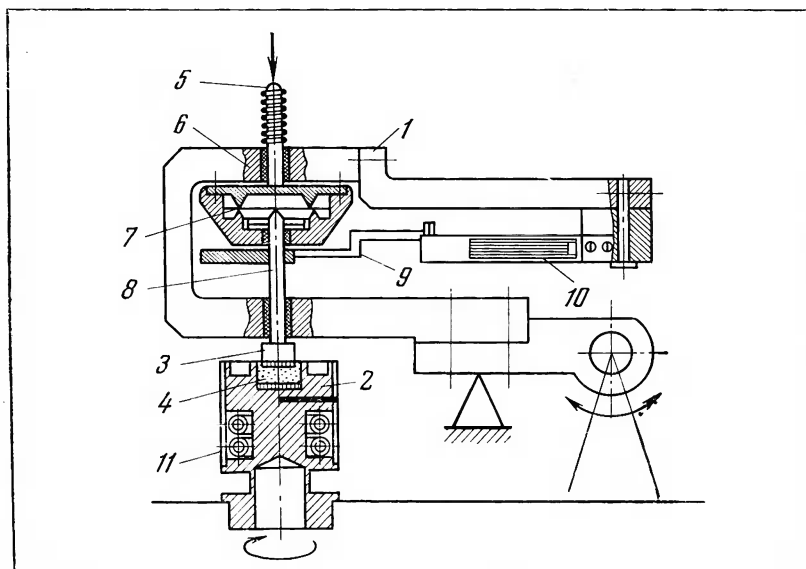


Рис. 6.9. Измерительный узел вращательного сдвига

1 — консоль; 2 — чашечка для грунта; 3 — ребристый диск; 4 — образец грунта; 5 — нагружающий шток; 6 — направляющая втулка; 7 — мембрана; 8 — шток; 9 — рычаг; 10 — тензометрическая балка; 11 — нагреватель

Узел вращательного сдвига (рис. 6.9) смонтирован на консоли 1. Перед испытанием он наклоняется к поворотной чашечке прибора 2 так, что рабочий орган — ребристый диск 3 — входит в контакт с поверхностью образца 4. Вертикальная нагрузка на рабочий орган осуществляется нажимной балкой через нагружающий шток 5. Шток перемещается в направляющей втулке 6 и передает давление через мембрану 7 и второй шток 8 на ребристый диск.

После приложения заданной вертикальной нагрузки, которая измеряется тензодатчиком на мембране 7, чашечка с образцами грунта приводится во вращательное движение вокруг вертикальной оси и увлекает за собой ребристый диск с его штоком. На штоке закреплен рычаг 9 с упором, касающимся измерительной тензометрической балки 10. Тензодатчики ФКП, наклеенные на балку, измеряют силу давления рычага. В процессе опыта эта сила нарастает и, достигнув максимума, остается постоянной или уменьшается. По максимальной силе вычисляется предельный крутящий момент, вызывающий срез образца под ребристым диском.

Вертикальная нагрузка на образец может изменяться от 0 до 6 Н/см², предельный крутящий момент — от 0 до 1,5 Н·см. Чашечка прибора оборудована нагревателем 11.

Сигналы тензометрических датчиков для измерения усилий и деформаций поступают на усилитель АНЧ-7М и далее на самописцы ПС-1. В результате каждого опыта получают две диаграммы зависимости усилия и деформации от времени, которые расшифровываются с помощью заранее составленных тарировочных таблиц. Точность измерения в среднем составляет около 10% от предельных величин.

При всех видах испытаний нагрузка прилагалась последовательно возрастающими ступенями, причем каждая ступень выдерживалась до прекращения деформации на диаграмме самописца. В среднем продолжительность опыта на пенетрацию составляла 3 мин. Учитывая полное отсутствие жидкостей в порах грунта и невозможность замедления деформаций за счет процессов фильтрационного уплотнения, такую продолжительность опыта можно признать достаточной для того, чтобы на каждой ступени опыта деформации считать завершенными.

Поскольку лунный грунт поступил в контейнер в атмосфере гелия и не подлежал контакту с нормальной атмосферой, все испытания проводились в гелии. Чтобы выяснить влияние вакуума и нормальной земной атмосферы на механические свойства, испытывались грунты-аналоги в нормальной атмосфере, атмосфере гелия и вакууме 10^{-5} мм рт. ст. при температуре 20 и 140° С.

На установке ТОР-1 исследовались также фрикционные свойства лунного грунта и двух его земных аналогов: андезито-базальтового песка, отобранного в районе Ключевского вулкана

на Камчатке, и базальта, взятого в монолитном и раздробленном состоянии из Берестовецкого карьера на Украине. В качестве контртел использовались образцы металлических и неметаллических материалов, применяемых в космической технике [86].

Для испытаний предоставлялось малое количество лунного грунта. Поэтому потребовалась разработка специальной методики подготовки образцов. Сущность ее заключается в том, что на один из торцов цилиндрической матрицы из алюминия, покрытый слоем эпоксидной смолы, напылялось исследуемое вещество, в данном случае — лунный грунт или два его земных аналога: андезит-базальтовый песок и молотый базальт.

Для изучения влияния вакуума, температуры и различных газов на физико-механические свойства реголита В. В. Шандором [88, 89] была построена вакуум-камера, краткое описание которой приводится ниже.

Камера (рис. 6.10) изготовлена из электрополированной нержавеющей стали и оборудована системой для откачки, состоящей из адсорбционного и магниторазрядного безмасляных насосов. Для измерения глубины вакуума применены термопарно-ионизационные вакуумметры. В стенках камеры имеются ввод электрокоммуникаций, оптические окна и устройство для передачи вращения в вакуум. Камера оборудована осветителями, электронагревательным элементом, кварцевыми высокочувствительными весами и масс-спектрометром для анализа откачиваемых газов.

Кварцевые весы применяются для регистрации изменений веса контрольной навески реголита в условиях меняющегося вакуума и температуры.

Отличительная особенность камеры В. В. Шандора состоит в том, что для определения механических параметров сопротивления грунта сдвигу используются наблюдения за величинами максимального и минимального углов наклона откоса, образуемых навеской реголита внутри непрерывно вращающегося прозрачного кварцевого барабана. Барабан имеет горизонтальную ось вращения, полированные торцы и ребристую внутреннюю поверхность цилиндрической стенки. Барабан вращается со скоростью $1/2$ оборота в час без вибраций через сильфонный ввод.

Внутри барабана насыпается навеска реголита или другого сыпучего материала, которая образует в нем призму сегментовидного сечения. При вращении барабана угол наклона откоса призмы медленно растет до тех пор, пока не наступает состояние предельного равновесия откоса, а затем его внезапное обрушение (рис. 6.11). В этот момент максимальный угол наклона ω сменяется на минимальный ψ . При продолжающемся вращении барабана крутизна откоса вновь нарастает, и цикл многократно повторяется. По результатам повторных измерений угла наклона откоса перед обрушением ω и после него ψ , по известной

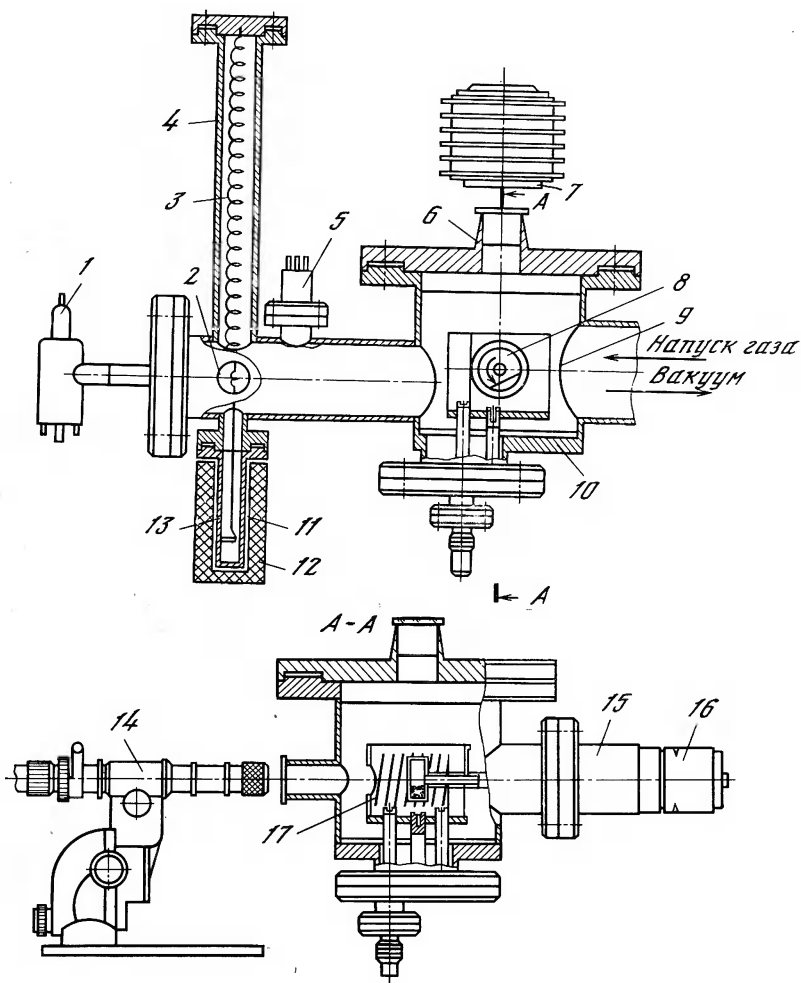


Рис. 6.10. Схема вакуум-камеры для исследования зависимости между содержанием адсорбированных газов и механическими свойствами реголита

1 — датчик масс-спектрометра; 2, 6 — оптические окна; 3 — кварцевые весы; 4 — кожух весов; 5 — электроводы; 7 — осветитель; 8 — вращающийся кварцевый барабан; 9 — тепловой экран; 10 — корпус камеры; 11 — отросток; 12 — нагреватель; 13 — чашечка кварцевых весов; 14 — оптическое измерительное устройство; 15 — устройство для передачи вращения в вакуум; 16 — электродвигатель; 17 — нагревательный элемент

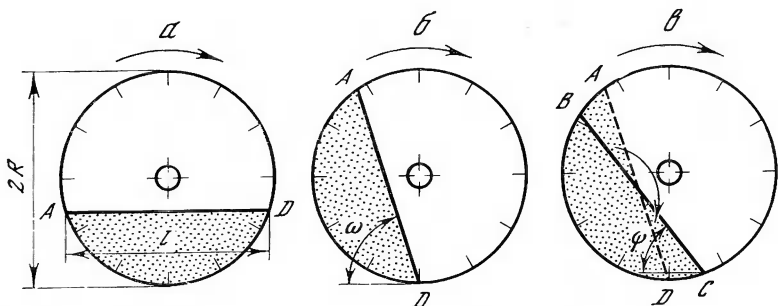


Рис. 6.11. Схема обрушения откоса навески реголита при вращении кварцевого барабана

а — исходное состояние; *б* — состояние предельного равновесия; *в* — обрушение откоса

длине откоса l , радиусу барабана R и объемному весу грунта γ с помощью формул, выведенных В. В. Шандором, можно определить сцепление c и угол внутреннего трения φ :

$$\varphi = \psi -$$

$$- \arctg \left\{ \frac{2}{\sin 2(\omega - \varphi)} - \frac{4 \sqrt{R^2 - l^2/4}}{l \cos^2 [(\omega - \varphi)/2] - \sqrt{R^2 - l^2/4} - \sin(\omega - \varphi)} \right\},$$

$$c = \gamma \left[\frac{l}{2} \sqrt{R^2 - \frac{l^2}{4}} \operatorname{tg} \frac{\omega - \psi}{2} \right] \frac{\operatorname{tg}(\omega - \psi) \sin(\omega - \varphi)}{2 \cos \varphi}.$$

Радиус барабана в этих опытах был равен 4 см, наибольшее вертикальное давление в массе грунта $\sim 0,03$ Н/см² и реголит находился в рыхлом насыпном состоянии, что необходимо учитывать при оценке результатов экспериментов.

На установке ТОР-1 и в камере В. В. Шандора в СССР исследовали не только реголит, но и различные минеральные порошки-аналоги.

В США для приема и обработки образцов лунных грунтов, доставляемых экспедициями «Аполлон», был сооружен комплекс лабораторий лунных образцов, зоны приема астронавтов, радиационной лаборатории и административно-хозяйственных служб.

В радиационной лаборатории образцы проходили первичный контроль на радиоактивность. В лаборатории лунных образцов имелись вакуум-системы, обслуживавшие помещения для приема и первичной обработки образцов, хранилище и транспортные системы для образцов, оборудование для предполетной стерилизации инструментов для отбора образцов на Луне, лаборатории для анализа газов, лаборатории физико-химических, минералогических и петрографических исследований, биологические лаборатории и вспомогательное оборудование, предназна-

ченное для выявления и изучения предполагавшихся возможными на Луне форм жизни. Зона приема астронавтов предназначалась для прохождения карантина экипажами лунных кораблей после возвращения из экспедиций, их биомедицинского обследования и обслуживания. После того как экспедиции «Аполлон-11 и -12» показали стерильность лунной поверхности, надобность в многочисленных биомедицинских лабораториях и карантинных помещениях отпала.

Изучению механических свойств грунтов в американской приемной лаборатории не было уделено должного внимания, и приборы, на которых проводились такие исследования, создавались по мере необходимости отдельными учеными. Их описание приводится в конце настоящей главы.

6.2. Результаты исследования образцов, доставленных «Луной-16, -20 и -24»

Детальные морфологические исследования типичного морского реголита, доставленного автоматической станцией «Луна-16», были выполнены К. П. Флоренским, Л. С. Тарасовым и их сотрудниками [80, 81].

Колонка реголита, отобранного станцией «Луна-16», целиком заполнила буровую трубу. Заметного перемешивания материала при транспортировке не отмечалось. Помещенный на лоток приемной камеры образец реголита не имел видимой слоистости и оказался однородным по всей высоте.

Реголит в целом представляет собой рыхлый темно-серый (черноватый) тонкозернистый порошок с включениями отдельных более крупных зерен, обладающих сильным зеркальным эффектом. По своему составу реголит относится к базальту с несколько повышенным количеством титана и железа и пониженным содержанием натрия и калия (табл. 6.1).

Реголит легко слипается в отдельные рыхлые комки и легко формуется. Несмотря на заметную слипаемость, он обладает неустойчивой, легко нарушаемой структурой. Нарушение начальной структуры реголита без всякого внешнего воздействия наблюдалось через несколько дней после его помещения в приемную камеру. Образец реголита с откосом в 30° , установленный в зоне очень слабого, но постоянного вибрационного действия, через несколько месяцев полностью растекся на подставке, приняв угол откоса не более 5° .

Наблюдалась высокая склонность реголита к электризации, вследствие чего его частицы прилипают к контактирующим с ним поверхностям твердых тел.

Установлено, что способность реголита к комкованию, слипаемости и электризации сохраняется длительное время при нахождении его в атмосфере сухого азота или гелия.

Таблица 6.1

Химические компоненты образцов лунного грунта и их процентное содержание по весу

Материал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Лунный грунт («Луна-16»)	41,90	3,36	15,33	16,66	8,78	12,53	0,34	0,10
Лунный грунт («Луна-20»)	44,40	0,56	22,9	7,03	9,70	15,20	0,55	0,10
Андезито-базальтовый вулканический песок	60,35	1,01	15,91	5,56	3,67	5,40	—	—
Молотый базальт	49,50	—	17,00	14,50	6,50	9,40	—	—

Примечание. Состав лунных грунтов приводится по данным книги: Лунный грунт из Моря Изобилия. Под ред. А. П. Виноградова. М., 1973; составы других материалов — по данным [84].

По А. П. Виноградову [77], в реголите можно выделить две основные разновидности частиц. Одни имеют угловатую форму и по внешнему виду похожи на только что раздробленные земные породы. Другие, их значительно больше, имеют окатанную форму, носят следы оплавления, спекания. Многие из таких частиц остеклованы с поверхности и похожи на стеклянные и металлические капли.

Вид таких частиц показывает, что их оплавление происходило, по всей вероятности, мгновенно при высоком нагреве холодной в целом частицы. На многих частицах реголита, как на брекчиях, так и, хотя и меньше, на кристаллических породах, можно видеть следы ударов метеоритов и микрометеоритов.

Внешний облик частиц реголита говорит о том, что они образуются под ударами метеоритов или метеоритных дождей, падающих на поверхность Луны с космическими скоростями и вызывающих тепловые взрывы. Под действием возникающих при взрыве высоких температур происходит оплавление кристаллических пород и их разбрасывание в расплавленном состоянии.

В реголите лунных морей встречаются также частицы отдельных минералов и железные частицы. На поверхности некоторых частиц обнаружено даже нержавеющее железо, крайне распыленное.

Изучение образцов грунта, доставленного станцией «Луна-20» из высокогорного района Луны, показало существенное отличие материкового реголита от морского. Материковый оказался значительно светлее, в нем преобладали обломки кристаллических пород и минералов. Окатанных и ошлакованных микробрекчий и сфероидов наблюдалось мало. В то же время вместо базальта значительную долю частиц составляли анортозиты и

их разновидности — породы также основного состава, но богатые полевым шпатом (алюмосиликатом). Очень редко здесь частицы из базальта. Вместе с тем и здесь встречаются частицы металлического железа. Содержание никеля также выше в реголите, чем в кристаллических анортозитах.

Таким образом, по данным «Луны-16 и -20» лунные моря слагаются базальтовыми породами, в то время как материки — породами, содержащими анортозиты. Изучение образцов лунных анортозитов показало, что по своему составу они напоминают земные и содержат более высокое по сравнению с базальтами количество алюминия и кальция.

По мнению А. П. Виноградова, образование морского реголита — результат дифференциации вещества магмы и вскипания лавы, когда она прорывает кровлю и оказывается на поверхности Луны в условиях космического вакуума. Излияние лавы сопровождается одновременно ее кипением и дроблением на мелкие частицы. На Земле тепло вулканов легко отводится благодаря теплопроводности атмосферы и ряду других факторов. На Луне нет условий для быстрого сброса тепла на ее поверхности, поэтому тепло магмы и лавы обращается на оплавление частиц реголита.

Большую роль в образовании реголита, как уже отмечалось, играют метеориты. По мнению А. П. Виноградова, удары микрометеоритов о поверхность Луны являются важным фактором глубокого разрыхления лунных пород. Однако такие удары не сглаживают морфологических и других особенностей морского и материкового реголита. В то же время благодаря действию теплового взрыва, образованию микрократеров, отверстий в частицах, ударных эффектов и т. п. метеориты оказывают специфическое влияние на морфологию частиц реголита.

Гранулометрическое исследование пробы лунного грунта, доставленного «Луной-16», проводилось Ю. И. Стахеевым, Е. К. Вульфсоном, А. В. Ивановым и К. П. Флоренским [81]. Отобранные с прямого лотка пробы разделялись ситовым методом. Ячейки сит имели размеры 900, 450, 200, 127 и 83 мкм. Набор сит размещался на вибрационном механизме шариковой вибромельницы.

Гранулометрические характеристики фракций с размерами частиц менее 83 мкм измерялись электрическим импульсным методом, позволяющим регистрировать распределение объемов частиц с размерами 0,2—83 мкм. Для исследования проб реголита диапазон размеров 0,2—83 мкм был подразделен на 16 интервалов. Размеры частиц образца в целом меняются от долей микрометра до нескольких миллиметров, что соответствует мелкозернистой части реголита.

На рис. 6.12 представлены гранулометрические характеристики исследованных проб. Средний размер частиц увеличивается с глубиной от 62 до 114 мкм. Размер самых крупных частиц

Рис. 6.12. Гранулометрический состав пробы реголита, доставленного «Луной 16»

D — крупность частиц, G — содержание частиц диаметром крупнее заданного в процентах по весу
1 — верхняя зона колонки; 2 — нижняя зона

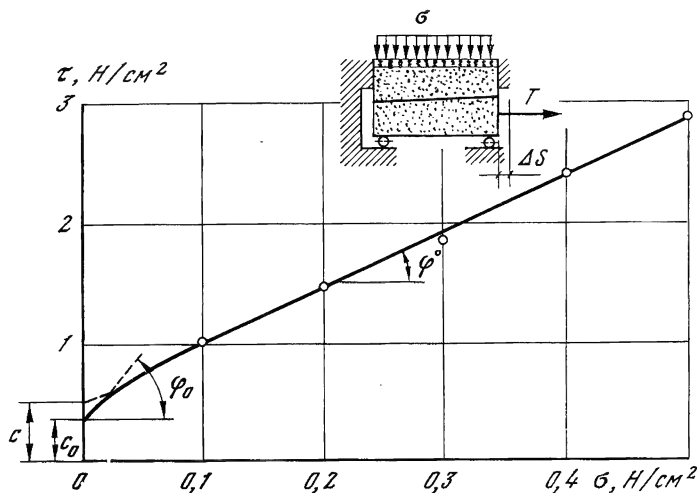
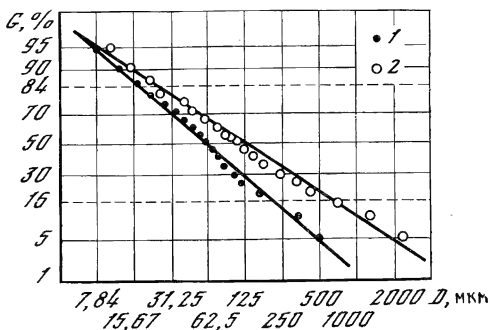


Рис. 6.13. Кривая сопротивления сдвигу реголита, доставленного «Луной-16», в атмосфере азота

σ — вертикальное давление на образец, τ — сопротивление сдвигу

плавно возрастает с глубиной от 1,5 до 2,9 мм. Поверхностные зоны обеднены по сравнению с глубинными как самыми крупными, так и самыми мелкими частицами, что компенсируется избытком частиц средних размеров (50—150 мкм). В реголите наблюдается дефицит частиц с размерами 1—2 мкм.

Обнаруженные особенности гранулометрических характеристик реголита подтверждают гипотезы о его образовании в результате соударения метеоритов с поверхностью Луны. Такие соударения являются причиной не только измельчения, но и переноса частиц на поверхности Луны, а также выброса с нее некоторой доли частиц с размерами менее 1—2 мкм.

Для определения физико-механических свойств грунта «Луны-16» в герметичном боксе приемной лаборатории было

выделено около 20 г грунта из средней части пробы, т. е. с глубины около 10 см от поверхности Луны. Опытами руководил В. В. Громов [83].

Плотность грунта в рыхлом насыпном состоянии оказалась равной $1,115 \text{ г/см}^3$, а после уплотнения вибрацией, ударами и трамбованием — $1,793 \text{ г/см}^3$, чему соответствуют коэффициенты пористости 1,7 и 0,67.

Коэффициент сжимаемости грунта a быстро уменьшался с ростом нагрузки. Образец, помещенный в компрессионный прибор в рыхлом насыпном состоянии, интенсивно уплотнялся уже при первых двух ступенях нагружения в такой последовательности:

Приращение вертикального давления Δp , Н/см ²	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5
Коэффициент сжимаемости a , см ² /Н	0,3	0,3	0,1	0,03	0,02

Высокие абсолютные значения a свидетельствуют о чрезвычайно большой сжимаемости реголита в рыхлом насыпном состоянии. В связи с этим испытания на сдвиг можно было провести только после предварительного уплотнения образца вертикальным давлением, равным максимальному давлению при проведении опыта на сдвиг. Оказалось, что уплотнение сильно влияет на сопротивление сдвигу. При плотности $\rho = 1,29 \text{ г/см}^3$ угол внутреннего трения равен $10\text{--}12^\circ$, при плотности $\rho = 1,51 \text{ г/см}^3$ он увеличивается до 22° , при $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$ доходит до 30° .

В результате опытов на сдвиг, проведенных разными методами, была построена обобщенная кривая сдвига (рис. 6.13). Ее криволинейный начальный участок соответствует данным, полученным при выпирании призмы грунта вверх под действием бокового давления в отсутствие вертикальной нагрузки.

Опыты с пенетрацией грунта конусным штампом весом 320 Н с углом при вершине 30° показали, что при плотности менее $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ конус проваливается на глубину более 12 мм и несущая способность ничтожно мала. При плотности $\rho = 1,75 \text{ г/см}^3$ удельное сопротивление пенетрации составляло $R_n = 16,5 \text{ Н/см}^2$.

Опыты с вдавливанием круглого плоского штампа диаметром 8 мм показали, что при рыхлом насыпном состоянии ($\rho = 1,12 \text{ г/см}^3$) штамп погружается без выпирания грунта в стороны, с образованием кольцевых трещин. В плотном грунте погружение штампа намного уменьшается и вокруг него появляются зоны выпирания с кольцевыми и радиальными трещинами. В ходе этих опытов получены следующие значения модуля общей деформации в зависимости от плотности грунта:

Плотность ρ , г/см ³	1,12	1,29	1,45	1,62
Модуль деформации E_0 , Н/см ²	1,5	2,9	8,5	24

Из образца, доставленного «Луной-20», было также отобрано 20 г из верхнего слоя глубиной до 10 см в естественном залегании. От образца «Луны-16» он отличался своим светло-серым цветом и более мелкими зернами [83].

Плотность грунта в рыхлом насыпном состоянии $1,04 \text{ г/см}^3$, а после уплотнения виброударным методом $1,798 \text{ г/см}^3$, чему соответствуют коэффициенты пористости 1,88 и 0,67. Как видно, грунт «Луны-20» способен к более рыхлой укладке, чем «Луны-16», а после вибрации, ударов и трамбования плотность обоих грунтов становится одинаковой.

Испытания грунтов, доставленных «Луной-20» и «Луной-16», проводились на одних и тех же приборах. Как показали опыты, компрессионная кривая грунта «Луны-20» практически совпадает с кривой грунта «Луны-16», т. е. сжимаемость обоих грунтов при одинаковых коэффициентах пористости оказалась одинаковой.

Результаты компрессионных испытаний грунта «Луны-20» были подвергнуты В. В. Громовым более глубокому анализу, который привел к выводу о том, что уравнение компрессионной кривой имеет двучленную структуру:

$$\varepsilon = 0,98e^{-0,5p} + 0,9e^{-0,1p},$$

где ε — коэффициент пористости, p — уплотняющее давление в Н/см^2 [83].

В диапазоне сжимающих напряжений от 0 до 4 Н/см^2 изменение ε определяется главным образом первым членом правой части формулы, а при более высоких значениях p — вторым.

В. В. Громов считает, что рыхлый грунт состоит из агрегатов, образованных слипшимися зернами. Эти агрегаты отличаются малой прочностью и образуют слабую структуру рыхло насыпанного образца. После приложения сжимающей нагрузки происходит два процесса: в первую очередь наблюдается сближение агрегатов и значительное уменьшение общей пористости грунта, во вторую происходит разрушение слабых агрегатов и сближение отдельных зерен, которые также ведут к уменьшению пористости, но уже в меньшем масштабе. По мнению В. В. Громова, в диапазоне сжимающих напряжений от 5 до 10 Н/см^2 уплотнение грунта происходит за счет разрушения агрегатов в местах их контактов. Два механизма деформации, описанные выше, отражаются двумя слагаемыми правой части формулы.

Используя большой образец грунта «Луны-20», который был представлен для его опытов, тот же исследователь провел весьма интересные наблюдения за деформацией прямоугольной призмы грунта, насыпанной в сосуд с прозрачными стенками при горизонтальном перемещении одной из вертикальных стенок в зависимости от исходной плотности образца.

Образец рыхлого грунта имел исходную плотность $1,04 \text{ г/см}^3$, сечение $30 \times 10 \text{ мм}$ и высоту 15 мм . После того как вертикальная стенка шириной 10 мм была смещена вперед на $11,5 \text{ мм}$, сечение образца уменьшилось до $18,5 \times 10 \text{ мм}$, высота увеличилась до $19,5 \text{ мм}$, а плотность возросла до $1,3 \text{ г/см}^3$.

Замечательно, что поверхность образца осталась горизонтальной и никаких признаков возникновения призмы выпирания замечено не было.

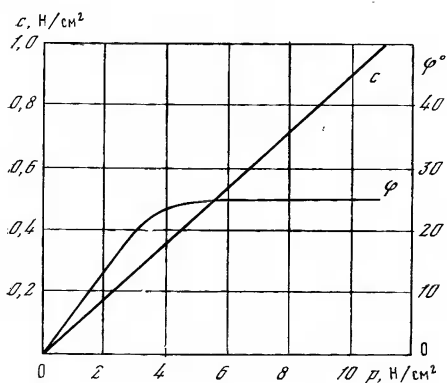


Рис. 6.14. Зависимость параметров сопротивления сдвигу реголита, доставленного «Луной-20», от уплотняющего давления

c — сцепление,
 φ — угол внутреннего трения,
 p — давление при предварительном уплотнении

Образец уплотненного грунта имел то же исходное сечение при плотности $1,6 \text{ г/см}^3$. При незначительном горизонтальном смещении стенки образовалась четкая призма выпирания и образец распался на две части по классической схеме Кулона. Угол наклона плоскости скольжения оказался равным 29° .

Общий характер сопротивления сдвигу у образца, доставленного «Луной-20», оказался подобным тому, что и у образца «Луны-16», но угол внутреннего трения был несколько меньше. Отмечено, что при увеличении уплотняющего давления и, следовательно, плотности грунта в интервале p от 0 до 5 Н/см^2 наблюдается быстрый рост угла внутреннего трения и сцепления. Затем оба параметра стабилизируются. В интервале $p = 5 \div 10 \text{ Н/см}^2$ средние значения $\varphi_{\text{ср}} = 25^\circ$ и $c_{\text{ср}} = 0,4 \text{ Н/см}^2$. В опытах с грунтом «Луны-20» получены кривые зависимости φ и c от уплотняющего давления (рис. 6.14).

Определение механических свойств грунта, доставленного «Луной-16», на установке ТОР-1 проводилось параллельно с испытанием двух его аналогов В. И. Дружининской, В. В. Маркачевым и др. [82]. Первый из них представлял собой андезитобазальтовый вулканический песок из пос. Ключи в Центральной Камчатке, второй — молотый базальт Берестовецкого месторождения УССР. В соответствии с классификацией грунтов по СНиП П-15-74, принятой в СССР, оба аналога относятся к числу пылеватых песков.

Таблица 6.2
Объемный вес лунного грунта и его аналогов

Состояние исследуемого материала	$\gamma \cdot 10^2, \text{Н/см}^3$		
	Лунный грунт	Андезито-базальтовый вулканический песок	Молотый базальт
Рыхлое, насыпное	0,126	0,105	0,100
Уплотнен постукиванием 50 раз	0,190	0,141	0,158
Дополнительно уплотнен стержнем	0,190	0,146	0,173

Плотность ρ минеральных зерен лунного грунта была принята равной $3,2 \text{ г/см}^3$, средний объемный вес γ по глубине погружения бура «Луны-16» — $0,0012 \text{ Н/см}^3$. Плотность минеральных зерен андезито-базальтового вулканического песка $2,79 \text{ г/см}^3$, плотность зерен молотого базальта $2,98 \text{ г/см}^3$. Объемный вес всех трех материалов меняется в широких пределах в зависимости от уплотнения.

Объемный вес определялся с помощью мерного стаканчика диаметром 11,3 мм, куда насыпали 1,7 г исследуемого грунта и определяли занимаемый им объем в рыхлом насыпном состоянии. Затем грунт уплотняли, постукивая стаканчиком 50 раз по твердой поверхности, а потом дополнительно вручную стержнем из органического стекла диаметром 8 мм. Результаты опытов приводятся в табл. 6.2.

В качестве общей характеристики прочности принято удельное сопротивление пенетрации R_n (Н/см^2), в качестве параметров сопротивления сдвигу — угол внутреннего трения φ и сцепление c (Н/см^2), в качестве параметра, характеризующего деформируемость при сжатии, — коэффициент относительной сжимаемости a_0 ($\text{см}^2/\text{Н}$). Опыты проводились А. А. Силиным, В. В. Маркачевым, А. И. Ведениным и авторами книги [84].

Удельное сопротивление пенетрации определялось по глубине внедрения в грунт металлического конуса с углом при вершине $\alpha = 30^\circ$ при заданной нагрузке на него P (Н). Оно вычисляется по формуле

$$R_n = K_d^n \frac{P}{\pi h^2 \operatorname{tg}^2(\alpha/2)},$$

при $\alpha = 30^\circ$ $R_n = 4,44 K_d^n P/h^2$.

В опытах на TOP-1 предельное сопротивление сдвигу определялось на приборе вращательного сдвига со сплошным ребристым диском. В ходе опыта определялся предельный крутящий момент, вызывающий срез по горизонтальной плоскости

под ребрами диска, и по величине этого момента вычислялось предельное сопротивление сдвигу по формуле

$$\tau_{\text{пред}} = 2 \frac{M_{\text{пред}}}{\pi r^3}.$$

Угол внутреннего трения и сцепления определяется графо-аналитическим путем по спрямленному графику зависимости предельного сопротивления от нормального давления на образец:

$$\varphi = \arctg[(\tau - c)/\sigma].$$

Коэффициент относительной сжимаемости a_0 в ходе опыта непрерывно изменяется, так как грунт под действием нормального давления уплотняется и сжимаемость его уменьшается. Поэтому вычисление коэффициента относительной сжимаемости ведется раздельно для разных интервалов нормального давления по формуле

$$a_0 = K_d^k \frac{\Delta S_i}{H_i \Delta p_i}.$$

В этих формулах приняты следующие обозначения: h — глубина погружения конуса в грунт в см; $M_{\text{пред}}$ — предельный крутящий момент при вращательном сдвиге в Н·см; r — радиус ребристого диска в см; σ — нормальное давление на образце в Н/см²; Δp_i — приращение нормального давления на интервале опыта в Н/см²; H_i — высота образца в начале опыта в см; ΔS_i — уменьшение высоты образца на интервале опыта в см; K_d^n, K_d^k — коэффициенты, учитывающие влияние боковых стенок цилиндра на значения пенетрации и компрессии; $\tau_{\text{пред}}$ — предельное сопротивление сдвигу в Н/см².

Использование схемы вращательного сдвига было принято вследствие малого количества лунного грунта, выделенного для опытов на ТОР-1, при котором невозможно применять обычные приборы одноплоскостного сдвига или трехосного сжатия. Общеизвестная формула для $\tau_{\text{пред}}$ предполагает, что эпюра распределения тангенциальных напряжений по радиусу ребристого диска при достижении предельного сопротивления сдвигу имеет треугольную форму.

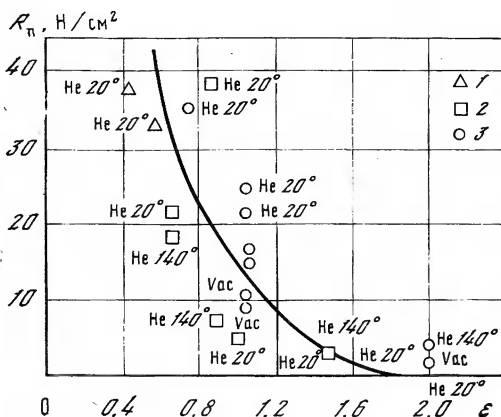
В ходе испытаний были проведены три пенетрационных, два компрессионных и три опыта на вращательный сдвиг.

По пенетрационным испытаниям получены таблицы значений удельного сопротивления пенетрации для всех исследованных грунтов, по которым затем составлен график (рис. 6.15), показывающий зависимость R_n от коэффициента пористости грунта e .

По компрессионным испытаниям построены кривые зависимости глубины погружения поршня от вертикального давления.

Рис. 6.15. Зависимость удельного сопротивления пенетрации R_n от коэффициента пористости ϵ грунта и условий проведения опытов

1 — реголит «Луны-16»;
2 — песок вулканический андезито-базальтовый;
3 — базальт молотый
He 20° — гелий при нормальном давлении и температуре 20° С;
He 140° С — то же, при температуре 140° С, Vac — вакуум при температуре 140° С



В результате обработки этих кривых найдены значения коэффициентов относительной сжимаемости для различных интервалов давлений (табл. 6.3).

По испытаниям на вращательный сдвиг построены графики зависимости предельного сопротивления сдвигу от нормального давления. На основании этих графиков получены значения углов внутреннего трения ϕ и сцепления c (табл. 6.4).

Результаты опытов в гелии при температуре 20 и 140°С и в вакууме 10^{-5} мм рт. ст. при 140°С показали, что главным фактором, определяющим удельное сопротивление пенетрации для всех исследованных материалов, является их коэффициент пористости. У рыхлых насыпных грунтов удельное сопротивление пенетрации минимальное: $R_n = 0,12$ Н/см², у грунтов, уплотненных постукиванием и обжатием штампом, оно увеличивается до 3,57—3,83 Н/см². По сравнению с влиянием пористости влияние среды и температуры в исследованных пределах оказалось второстепенным. Можно отметить, что у грунтов в рыхлом насыпном состоянии сопротивление пенетрации в гелии при 140°С оказалось несколько выше, чем при 20°, а в вакууме — почти таким же, как в гелии. Для уплотненных грунтов переход от 20 до 140°С в большинстве случаев приводил к некоторому снижению сопротивления пенетрации, такое же влияние дал и переход к вакууму. В целом все результаты опытов с пенетрацией следует рассматривать как предварительные, так как на них слишком большое влияние оказывали условия насыпания грунта в чашечку прибора и его дальнейшая обработка.

При компрессионных испытаниях в первую очередь были получены кривые для лунного грунта и его аналогов в атмосфере гелия в условиях нормального давления и температуры 20°С. По этим кривым вычислены значения a_0 .

Поскольку испытания лунного грунта в вакууме по ряду причин провести не удалось, были поставлены специальные опыты

Таблица 6.3

Коэффициент относительной сжимаемости α_0 в $\text{см}^2/\text{Н}$ в различной атмосфере и вакууме для грунтов-аналогов

Материалы и интервалы сжимающих напряжений, $\text{Н}/\text{см}^2$	Условия проведения испытаний		
	Гелий, 20°C	Гелий, 140°C	Вакуум 10^{-5} мм рт. ст., 140°C
Молотый базальт			
0—1	0,220	0,255	0,284
1—2	0,0286	0,022	0,047
2—10	0,0064	0,0071	0,008
Андезито-базальтовый вулканический песок			
0—1	0,117	0,090	0,066
1—2	0,014	0,021	0,017
2—10	0,0045	0,006	0,006

Примечание. Исходное состояние грунта рыхлое, насыпное, при следующих значениях коэффициента пористости: базальт $e_0 = 2,0$, андезито-базальтовый песок $e_0 = 1,39$.

Таблица 6.4

Параметры сопротивления сдвигу при разных условиях

Материал	Условия проведения испытаний					
	Воздух		Вакуум 10^{-5} мм рт. ст.			
	20°C		20°C		140°C	
	φ	$c, \text{Н}/\text{см}^2$	φ	$c, \text{Н}/\text{см}^2$	φ	$c, \text{Н}/\text{см}^2$
Андезито-базальтовый песок	$27^\circ 30'$	0	$25^\circ 30'$	0,04	$23^\circ 40'$	0,04
Молотый базальт	$30^\circ 30'$	0	$26^\circ 50'$	0,36	$27^\circ 00'$	0,04

Примечание. Перед испытанием грунты уплотняли постукиванием и кратковременным приложением вертикального давления $\sigma = 0,55 \text{ Н}/\text{см}^2$.

с аналогами в атмосфере гелия при температурах 20 и 140°C и в вакууме 10^{-5} мм рт. ст. при температуре 140°C для выяснения вопроса, насколько меняются свойства грунта при переходе от атмосферы гелия к вакууму. Результаты этих опытов представлены в табл. 6.3.

Анализ таблицы 6.3 показывает, что лунный грунт в рыхлом насыпном состоянии обладает чрезвычайно большой сжимаемостью, которая, однако, при первоначальном обжатии давлением в $2 \text{ Н}/\text{см}^2$ снижается в несколько раз, хотя вплоть до конца опыта при сжимающем напряжении $6\text{--}8 \text{ Н}/\text{см}^2$ остается все еще большой, значительно превышающей сжимаемость распространенных на Земле песчаных грунтов в обычных для послед-

них среднеплотном и плотном состояниях. То же относится и к грунтам-аналогам — молотому базальту и вулканическому андезито-базальтовому песку, характеристики сжимаемости которых близки к характеристикам лунного грунта и свидетельствуют о высокой сжимаемости этих материалов в рыхлом насыпном состоянии. Результаты испытаний говорят о том, что в указанных условиях эти материалы как аналоги лунного грунта выбраны удачно и могут служить его заменителями в экспериментах, связанных со сжимаемостью.

На основании анализа табл. 6.3 можно отметить, что у обоих материалов при всех условиях испытаний на одинаковых интервалах нагружения коэффициенты сжимаемости имеют значения одного порядка. На первом этапе происходит первоначальное обжатие и коэффициент относительной сжимаемости приобретает максимальные значения, затем он резко снижается и на последнем этапе доходит до значений $0,008 \text{ см}^2/\text{Н}$. Однако и эти последние значения все еще значительно превышают обычные для земных пылеватых песков средней плотности значения $a_0 \approx \approx 0,001 \text{ см}^2/\text{Н}$.

Влияние подогрева и вакуума на свойства образцов проявляются различно. У молотого базальта сжимаемость несколько возрастает на всех интервалах нагружения, что может быть связано с некоторым разуплотнением образцов при подогреве и откачке. У андезито-базальтового вулканического песка на первом этапе нагружения сжимаемость снижается, а на последующих — несколько увеличивается. Однако в обоих случаях резкого изменения свойств не отмечается и в общем можно считать, что испытания в атмосфере гелия при нормальном давлении и температуре 20°C дают приблизительно те же результаты, что и испытания в вакууме 10^{-5} мм рт. ст. при 140°C . Причину этого следует искать, с одной стороны, в недостаточно большой глубине вакуума, а с другой — в том, что внутри образца мелкодисперсного грунта под поршнем прибора вакуум, по всей вероятности, хуже, чем в камере ТОР-1 в целом.

В дополнение к описанным испытаниям были сделаны контрольные опыты с компрессией грунтов-аналогов в ТОР-1 в атмосфере воздуха при 20°C и влажности 75%. Они показали, что в большинстве случаев сжимаемость обоих аналогов в воздухе заметно выше, чем в гелии и в вакууме, что объясняется влиянием гигроскопической влаги. Заметно, что оба аналога, высушенные до постоянного веса, интенсивно поглощали влагу из воздуха и гигроскопическая влажность их в разных опытах изменялась от 1,5 до 3,0%.

Первые испытания с вращательным сдвигом были сделаны для определения свойств лунного грунта и его аналогов в атмосфере гелия при нормальном давлении и температуре 20°C . Анализ табл. 6.4 показывает, что в среднем лунный грунт и его аналоги имеют близкие параметры сопротивления сдвигу и харак-

теризуются в данных условиях испытания низким сцеплением — от 0 до 0,36 Н/см². Несколько неожиданным явились значения углов внутреннего трения, которые в среднем оказались равными 26—30°. Ранее приводившиеся в литературе данные о лунных грунтах и исследования их земных аналогов, как правило, сходились на цифрах 35—37° и даже выше. В связи с этим были поставлены дополнительные опыты с аналогами на вращательный сдвиг в атмосфере воздуха при 20°С и вакууме 10⁻⁵ мм рт. ст. при 20 и 140°С.

В табл. 6.4 приведены данные для осредненных графиков зависимости сопротивления сдвигу от нормального давления. Как видно, переход от испытаний в атмосфере воздуха к испытаниям в вакууме приводит к появлению небольшого сцепления и снижению угла внутреннего трения.

При уменьшении размеров испытательных приборов и увеличении отношения высоты образца к его диаметру возрастает влияние стенок рабочего цилиндра, в котором проводятся опыты на пенетрацию, компрессию и сдвиг. Трение грунта о стенки приводит к более рыхлой укладке его при свободном насыпании в прибор, оно вызывает дополнительное сопротивление сжатию при компрессии и может сказаться на результатах опыта с вращательным сдвигом, поскольку ограничивает движение периферийных зерен образца. При опытах с пенетрацией стенки мешают свободному расширению грунта в сторону и увеличивают сопротивление грунта внедрению конуса.

По-видимому, применение для исследования механических свойств грунта приборов таких малых размеров, какие были вынуждены использоваться при опытах на ТОР-1, в механике грунтов встречается впервые. До сих пор наименьшим диаметром образца признавали приблизительно 4 см, что в 3,5 раза больше, чем на ТОР-1. В связи с этим предприняты экспериментальные исследования масштабного фактора.

Для опытов с пенетрацией установлено, что отношение удельного сопротивления пенетрации при чашечке диаметром 40 мм к той же величине при диаметре чашечки 11,3 мм для конуса с углом 30°, весом 205 Н составляет 0,33—0,45. Соответствующие поправки внесены в результаты опытов и учтены при составлении графика.

В отношении коэффициента относительной сжимаемости можно ожидать противоположного влияния масштаба образца, но окончательное значение поправочных коэффициентов пока не установлено и данные в табл. 6.4 приводятся без их учета.

Сравнение фрикционных свойств исследуемых горных пород, находящихся в монолитном и тонкодробленном состояниях, осуществлялось первоначально при отработке методики в нормальных атмосферных условиях на специальной установке с возвратно-поступательным движением при трении образцов из магниевого и титанового сплавов по грунтам-аналогам, представлен-

ным базальтом, пенобетоном и плотным туфом [86]. В этих экспериментах земные горные породы использовались как в виде монолитных образцов, так и в виде порошков, наклеенных на металлические пластинки. Как показали результаты измерений, расхождение в величинах коэффициентов трения монолита по контртелу и порошка, нанесенного на металлическую пластинку, по тому же контртелу не превышало 5—7%.

В дальнейшем эта методика была проверена на узле трения прибора ТОР-1 в вакууме со степенью разрежения 10^{-5} мм рт. ст. В соответствии с разработанной методикой были изготовлены дюралюминиевые цилиндрические образцы диаметром 22 мм и высотой 20 мм. Одна из торцовых поверхностей покрывалась тонким слоем эпоксидной смолы, на которую через сито с максимальной величиной ячейки 0,2 мм напылялся слой исследуемого материала. На изготовление одного образца расходуется 70 мг вещества. Следует отметить, что лунный грунт наклеивается на торцовые поверхности цилиндров в среде гелия.

Исследование фрикционных свойств испытуемых материалов осуществлялось в два этапа. На первом этапе фрикционные свойства грунта и его двух аналогов определялись в среде химически чистого гелия при температуре 20° С.

Анализ результатов первого этапа исследований показал, что лунный грунт по своим фрикционным свойствам близок к земным аналогам, причем из двух грунтов-аналогов ближе к лунному грунту стоит базальтовый порошок. Это свойство базальтового порошка привело к тому, что при его использовании был выполнен второй этап исследований по влиянию вакуума и повышенных температур на фрикционные свойства базальта.

Методика проведения второго этапа экспериментов заключалась в следующем. Испытуемая пара помещалась в вакуумную камеру. Первоначально при закрытом вакуумном затворе осуществлялось определение коэффициента трения в нормальных атмосферных условиях при комнатной и повышенной температурах. Далее воздух из камеры откачивался до давления 10^{-5} мм рт. ст. и параллельно с откачкой образец подвергался нагреву. Контроль температур осуществлялся хромель-копелевой термопарой, которая с помощью специального подвижного устройства прижималась к образцу горной породы в зоне трения. После достижения максимального вакуума и необходимой температуры термопара и нагреватель отводились от образца, включался электродвигатель, приводящий во вращение образец горной породы, подводилось контртело, устанавливалось стационарное тепловое поле образца горной породы и контртела и проводился эксперимент. Как показал опыт, за время эксперимента температура поверхности образцов снижалась на 7—12%, что существенно не сказывалось на результатах измерений.

Сводка результатов исследований фрикционных свойств представлена в табл. 6.5 и 6.6.

Таблица 6.5

**Коэффициент трения между лунным грунтом и его аналогами
и различными контртелами**

Контртело	Лунный грунт	Базальт молотый	Песок андезито- базальто- вый	Примечание
Резина натуральная (ладонь перчатки)	0,5	0,5	0,65	Виден износ
Капроновая ткань, эластик (верх перчатки)	0,4	0,4	0,55	Интенсивно изнашивается
Фенилон (верх комбинезона)	0,5	0,45	0,6	То же
Резина натуральная (подошва)	0,55	0,5	0,6	Видны следы износа
Силиконовая резина (подошва)	0,55	0,5	0,6	Износа нет
Фенилон кирза (верх ботинка)	0,4	0,35	0,4	Интенсивно изнашивается
Кожа натуральная (верх ботинка)	0,4	0,5	0,45	Виден износ
Кожа натуральная (подошва ботинка)	0,35	0,4	0,4	То же
Магниевый сплав	0,3	0,2	0,3	Интенсивно изнашивается
Дюралюминий	0,45	0,25	0,4	Видны следы износа
Титановый сплав	0,35	0,3	0,3	Износа нет
Нержавеющая сталь	0,25	0,25	0,25	То же
Конструкционная сталь-3	0,3	0,25	0,3	»
Твердый сплав ВК-8	0,3	0,4	0,3	

В. В. Шандор вместе с другими учеными [88, 89], используя вакуум-камеру, описанную ранее, определил состав продуктов термодесорбции из образца реголита, доставленного «Луной-16». Исследование проводилось при ступенчатом нагреве в вакууме от комнатной температуры до 800°С. Выделенные при постоянной температуре через каждые 100°С газы анализировались радиочастотным масс-спектрометром с одновременным определением потери веса исследуемого образца.

Общее количество газов, выделенных при нагревании реголита до 800°С, составило 0,032% от веса образца, т. е. очень мало, главная роль принадлежала водяному пару (табл. 6.7).

Обсуждая результаты своих опытов и сравнивая их с результатами аналогичных опытов, проводившихся в США, В. В. Шандор отмечает [88, 89], что в различных образцах реголита, доставленных экспедициями «Аполлона», содержание адсорбированной влаги колеблется от 4,6 до 20,5 мкмоль/г, в то время как в исследованном им реголите, доставленном «Луной-16»,

Таблица 6.6

Коэффициент трения между базальтом и различными контртелами

Контртело	Условия эксперимента				
	в воздухе		в атмосфере гелия		в вакууме
	25° С	140° С	25° С	140° С	150° С
Резина натуральная (перчатка)	0,25	0,25	0,5	0,2	0,15
Эластик (перчатка)	0,25	0,25	0,4	0,2	0,3
Фенилон (комбинезон)	0,25	0,3	0,45	0,3	0,3
Резина натуральная (подошва)	0,4	0,25	0,5	—	—
Силиконовая резина (подошва)	0,35	0,3	0,5	0,4	0,3
Кожа натуральная (верх ботинка)	0,3	0,25	0,4	0,2	0,2
Кожа натуральная (подошва)	0,35	0,25	0,4	0,2	0,2
Магниевый сплав	0,25	0,15	0,2	0,2	0,15
Дюралюминий	0,35	0,3	0,3	0,35	0,2
Титановый сплав	0,35	0,35	0,35	0,25	0,3
Нержавеющая сталь	0,45	0,4	0,3	0,4	0,4
Конструкционная сталь-3	0,45	0,4	0,35	0,45	0,4
Твердый сплав ВК-8	0,5	0,5	0,4	0,55	0,4

Таблица 6.7

Состав газов, выделенных из реголита «Луны-16» при нагреве до 800° С

Газы	Количество десорбированных газов	
	абсолютное, мкмоль/г	относительное от суммы газов, % по весу
H ₂ O	7,28	42,5
CO ₂	1,90	26,3
CO	2,27	20,1
H ₂	10,0	6,5
N ₂	0,31	2,8
He	1,42	1,8
O ₂	Не обнаружено	Не обнаружено

оно равно 8,18 мкмоль/г. Указывая, что, по мнению ряда исследователей, происхождение влаги в реголите смешанное и только часть влаги содержалась в нем уже на Луне, а часть добавилась при доставке на Землю и при лабораторных исследованиях на Земле, В. В. Шандор полагает роль земной контаминации

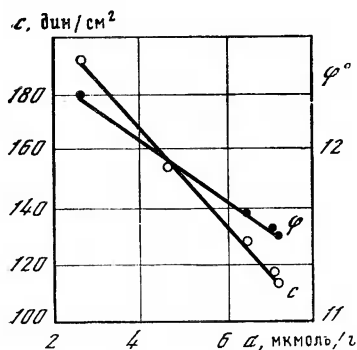
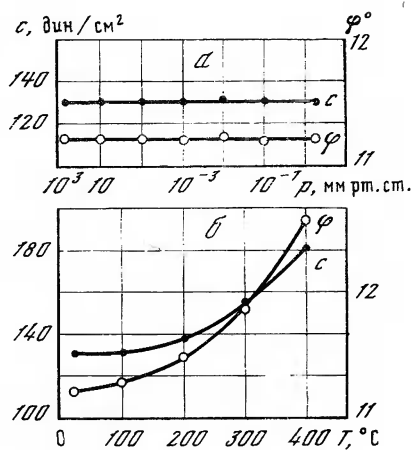
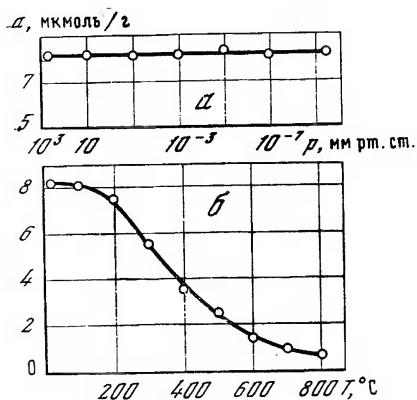


Рис. 6.16. Зависимость количества воды a в реголите, доставленном «Луной-16», от глубины вакуума при комнатной температуре (а) и от температуры прогрева образца в вакууме (б)

Рис. 6.17. Зависимость сцепления c и угла внутреннего трения ϕ реголита («Луна-16») от глубины вакуума при комнатной температуре (а) и от температуры прогрева образца в вакууме (б)

Рис. 6.18. Зависимость сцепления c и угла внутреннего трения ϕ от количества воды в реголите («Луна-16»)

незначительной. Основными источниками влаги на Луне являются, по его мнению, протоны солнечного ветра, хотя не исключено ее присутствие в первичных лунных породах, метеоритном и кометном веществах, а также образование в результате химических реакций.

На рис. 6.16 показана зависимость содержания воды в реголите от глубины вакуума при комнатной температуре и от температуры при вакууме порядка $5 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст. Как видно, при комнатной температуре увеличение разрежения не приводит к десорбции и количество влаги остается постоянным. Наоборот, повышение температуры выше 200°C приводит к быстрому удалению влаги. Следует отметить, однако, что даже при 400° остается немного меньше половины исходного количества влаги и только при 800° около 10%. Это указывает на прочную химическую связь остающихся молекул влаги с поверхностью минеральных частиц реголита.

Дальнейшие опыты в той же вакуум-камере имели целью определение зависимости параметров s и ϕ от глубины вакуума при комнатной температуре и от температуры прогрева в вакууме порядка $5 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст. Из рис. 6.17 видно, что при комнатной температуре сцепление s и угол внутреннего трения ϕ не зависят от глубины вакуума. Наоборот, повышение температуры ведет к значительному увеличению сцепления и некоторому росту внутреннего трения. Наблюдается обратная зависимость между содержанием влаги в реголите (в исследованном диапазоне) и параметрами сопротивления сдвигу, которая представлена графически на рис. 6.18. Это объясняется проявлением молекулярных сил в контактах минеральных частиц, освобожденных от большей части адсорбированных веществ.

В описанных опытах максимальное сцепление между зернами реголита при наибольшей достигнутой чистоте оценено в 10^7 — 10^8 дин/см² (от 100 до 1000 Н/см²). Но, поскольку число контактов в рыхлом реголите невелико, среднее по сечению максимальное достигнутое сцепление около 200 дин/см². Угол внутреннего трения при этом близок к 12°.

После достижения максимальной очистки в камеру проводили напуск различных газов. При этом оказалось, что чистые газы — аргон, гелий, водород и азот — не меняют контактно-механических свойств реголита. Напуск углекислоты вызывает незначительное уменьшение сцепления и трения. Однако даже кратковременная выдержка реголита в кислороде нарушает сцепление частиц в контактах.

6.3. Результаты исследования образцов, доставленных экспедициями «Аполлон»

Несмотря на большое количество образцов реголита и каменных материалов, имеющих в распоряжении американских ученых, исследований их физико-механических свойств, имеющих значение для грунтоведения, сделано пока немного, хотя большое число работ выполнено по определению химического и минералогического состава, содержания изотопов, магнитных и электрических свойств, возраста лунных пород, их альbedo и т. п. Главная причина этого кроется, по-видимому, в том, что перечисленные исследования можно проводить на малых количествах лунного вещества, в то время как определение, например, сжимаемости и параметров сопротивления сдвигу, столь важных для грунтоведения, требует десятков и сотен граммов. Поскольку в США принято решение сохранить главную массу доставленных образцов в полной неприкосновенности до тех пор, пока не будут разработаны новые, более совершенные способы их изучения, больших образцов для грунтоведческих работ ученые США пока не получили. Частично результаты американ-

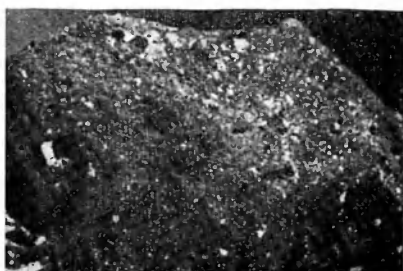
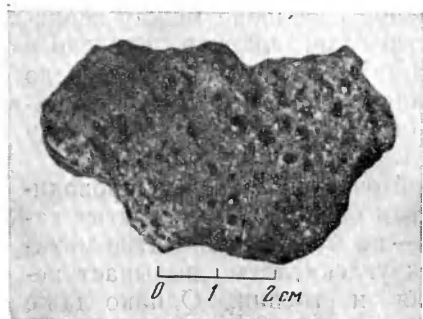
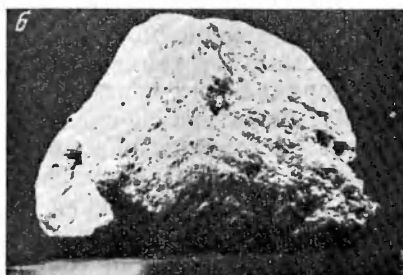
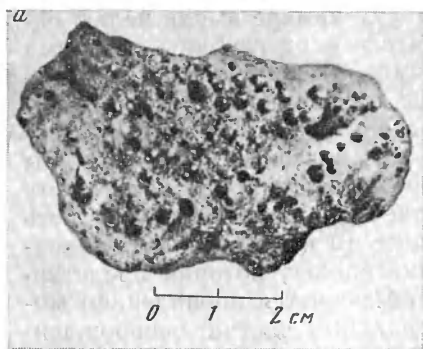


Рис. 6.19. Образцы пористых камней (а) и брекчий (б), доставленных экспедицией «Аполлон-11»

ских исследований опубликованы в официальных отчетах НАСА [66—71] и статьях отдельных ученых [57, 59, 73, 90]. Ниже будут кратко рассмотрены данные, полученные из этих источников.

Материал, доставленный экспедицией «Аполлон-11», был разделен на четыре типа: 1) мелкозернистые мелкопористые изверженные твердые породы; 2) среднезернистые изверженные твердые породы, содержащие пустоты; 3) брекчии; 4) реголит пылевато-песчаного состава (рис. 6.19).

Все кристаллические породы относятся к поверхностным лавам или изверженным породам, расположенным близко от поверхности. Они содержат магматические минеральные ассоциации и пустоты, свидетельствующие о кристаллизации из расплава.

Темно-серый пористый обломок 1-го типа обладает плотностью около $3,4 \text{ г/см}^3$. В нем имеются поры диаметром от 1 до

3 мм, которые выстланы изнутри блестящими кристаллами минералов основной массы.

Обломок 2-го типа серовато-коричневатого цвета, с пустотами, неправильной формы. Его плотность $3,2 \text{ г/см}^3$, структура зернистая, с зернами размерами от 0,2 до 3 мм. Самые крупные кристаллы минералов выходят внутрь полостей и пустот.

Брекчии 3-го типа представляют собой сцементированную смесь обломков пород различного состава. У них серый и темно-серый цвет с различными оттенками обломков (рис. 6.19, б). Обломки представлены названными выше породами или зернами слагающих их минералов, угловатыми осколками и шариками стекла. В общем строение брекчий сложное и указывает на их ударно-взрывное происхождение (присутствие микротрещин, различная степень остеклования, неоднородность, разная степень уплотнения и разная твердость).

Для всех крупнообломочных образцов лунных пород характерна необычайная поверхность — наличие небольших углублений, выстланных стеклом, и стеклянные брызги. Средний диаметр ямок немного больше 1 мм. В нескольких образцах ямки наблюдались только на округленных сторонах, а на одной из сторон их не было. Именно эта сторона обычно была плоская и неровная. Наиболее заметная особенность образцов — округление одного или нескольких углов. Над поверхностью брекчий обычно выступают крупные зерна, по внешнему виду похожие на земные осадочные породы разной зернистости, выветренные и обработанные песком. Все эти особенности говорят о существовании на поверхности Луны эрозийных процессов.

В образцах твердых пород присутствуют клинопироксен, плагиоклаз, ильменит и самородное железо. В незначительных количествах найден оливин.

На рис. 6.20 представлены кумулятивные кривые гранулометрического состава образцов реголита, доставленных на Землю экспедициями «Аполлон». Все они относятся к пылеватым пескам. Крупность зерен колеблется чаще всего в пределах 0,03—1 мм. В состав реголита входят угловатые обломки горных пород, кристаллические обломки минералов, стеклянные шарики, а среди крупных фракций — также и каменно-стеклянные агрегаты. Слоистости не наблюдается.

В пробах обнаружены плагиоклаз, клинопироксен, ильменит, оливин и стекла. Очень редко попадают шарики и округленные зерна железоникелевого состава крупностью до 1 мм. Строение зерен говорит о перенесенном ими плавлении под действием сильных ударов. Крупность зерен увеличивается вместе с глубиной от поверхности. Некоторые пробы по своему составу относятся к крупнозернистым и даже гравелистым пескам. Но преобладают пески мелкие и пылеватые.

Фракции крупностью менее 2 мм характеризуются высоким содержанием стекла. Осколки минералов преобладают среди

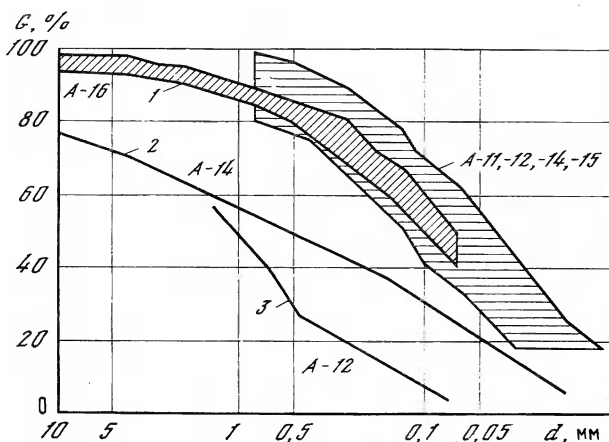


Рис. 6.20. Кривые гранулометрического состава реголита, доставленного ко-

d — крупность частиц в мм; G — суммарное содержание частиц диаметром крупнее заданного в процентах по весу

1 — образцы в мешках; 2 — грунт из низа траншеи; 3 — крупнозернистый грунт

мелких зерен, чаще всего присутствуют плагиоклаз и пироксен. Во фракциях мельче 0,063 мм встречаются стеклянные осколки, остроугольные, бесцветные или бледно-зеленые. С увеличением крупности зерен увеличивается содержание темно-коричневых стеклянных осколков, многие из которых агглютинированы. Встречаются стеклянные шарики. В более крупных фракциях увеличивается количество обломков горных пород. Обломки минералов плагиоклаза, пироксена, оливина чаще встречаются среди фракции 33—63 мкм.

Образец из Кон-кратера существенно отличается от других большей крупностью зерен, очень низким содержанием стекла и высоким содержанием обломков скальных пород, даже в мелких фракциях.

Четыре грунтоноса, доставленные «Аполлоном-14», были исследованы без вскрытия с помощью рентгеновской стереосъемки. Образцы имеют слоистое строение с толщиной слоя от 0,5 до 13 см. На снимках видны зерна крупностью от 2 до 12 мм, рассеянные среди более мелких фракций. Содержание крупных зерен увеличивается с глубиной от поверхности грунта. Результаты определения плотности образцов в грунтоносах приведены в табл. 6.8.

На поверхности зерен лунного мелкозема имеются следы сверхскоростных ударов мельчайших метеоритов. Снимки таких зерен получены на сканирующем электронном микроскопе. Размеры частиц, представленных на снимках, колебались в преде-

лах нескольких миллиметров, т. е. они относились к крупному и гравелистому песку. На одном из зерен можно было насчитать по крайней мере восемь ударов микрометеоритов.

В зависимости от материала зерна и энергии ударяющего микрометеорита, а также от строения самого зерна следы ударов имеют разный вид. Одна из частиц представляла собой полный круглый шарик из хрупкого стекла диаметром около 5 мм и была пробита в нескольких местах. Вокруг пробоев образовались концентрические и радиальные трещины, создающие сходство с лунным кратером в миниатюре.

Другие частицы были сплошными. Хрупкий характер разрушения виден на рис. 6.21, а.

Постоянное воздействие микрометеоритов приводит к дроблению частиц реголита на более мелкие осколки, но в то же время вызывает их оплавление, которое затем ведет к слипанию мелких зерен в более крупные агрегаты. Эти два процесса, по-видимому, уравнивали друг друга. Удары более крупных метеоритов вызывают выброс вещества из кратера. Выбросы из самых больших кратеров, возможно, распространяются на всю поверхность Луны. Благодаря этому на Луне вполне вероятны сложные напластования, в которых слои, бывшие когда-то на поверхности, погребены под массами свежих выбросов. В результате плотность и состав отложений могут сильно изменяться на малых расстояниях.

В работе, опубликованной в 1973 г. [57], американские ученые В. Кэрьер, Дж. Митчел и А. Махмуд описывают результаты комплексного исследования гранулометрии, формы зерен, удельного веса и максимальной плотности лунного реголита, проведенного на нескольких образцах с массой менее 1 г, доставленных экспедициями «Аполлон-11, -12, -14 и -15». Согласно их данным в реголите присутствуют осколки минералов (плагиоклазы, пироксены, ильменит, оливин, полевой шпат и очень редко кварц), осколки горных пород (базальты, пироксениты, полевошпатовые породы, брекчии), застывшие капли и осколки разных стекол и агглютинаты. Последние представляют собой осколки минералов, пород и стекол, слипшиеся в неоднородную

Таблица 6.8

Определение плотности образцов по данным экспедиций «Аполлон»

Экспедиция	$\rho_{\min}$, г/см ³	$\rho_{\max}$, г/см ³
«Аполлон-11»	1,74	1,98
«Аполлон-14»	1,60	1,75
«Аполлон-15»	1,36	2,15

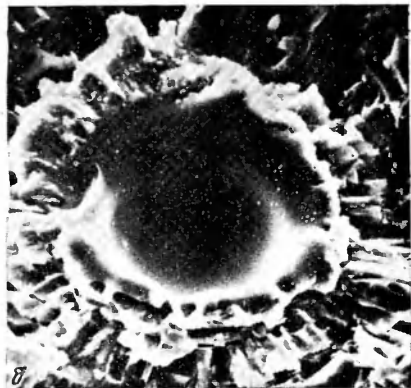
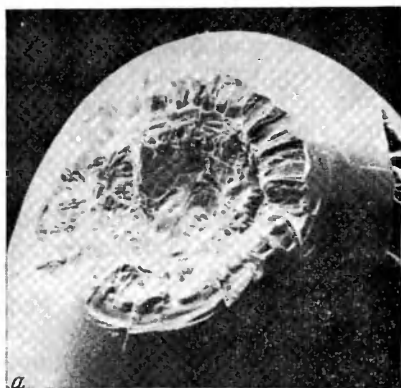


Рис. 6.21. Зерна реголита со следами хрупкого (а) и вязкого (б) разрушения под ударами микрометеоритов

массу в процессе просачивания в пористый грунт расплавленного стекла. В отличие от них брекчии также состоят из спекшихся осколков и обломков, но связывающее их стекло не просочилось извне, а образовалось на месте в момент удара метеорита.

Несмотря на большие расстояния между местами отбора образцов, гранулометрический состав реголита сходен и укладывается в узкие границы между песчано-пылеватыми и пылеватыми грунтами (по американской классификации от SW—SM до ML). Средняя крупность зерен реголита 70 мкм. По мнению американских исследователей, для создания этого устойчивого состава потребовалось не менее 100 млн. лет.

Форма зерен в образцах, доставленных экспедициями «Аполлон», весьма разнообразна — от правильных шариков до разветвленных сложных агрегатов. Большая часть зерен имеет угловатую форму и удлинена в каком-либо направлении. Стекланные шарики, получившие большую известность среди широкой публики благодаря тому, что их присутствие создает эффект искрящейся поверхности, встречаются редко, и общее количество их в изученных пробах невелико. Удельная поверхность по адсорбции азота в одном из образцов «Аполлона-14» оказалась равной 0,21 м²/г, «Аполлона-15» — 0,65 м²/г.

Плотность зерен согласно имеющимся данным колеблется от 2,9 до 3,2 г/см³. Только у высокопористых агглютинатов она снижается до 1,0 г/см³.

Плотность самого реголита увеличивается с глубиной. Она быстро растет в пределах 10 см от поверхности, а затем значительно медленнее. Если принять за 100% максимальную плотность утрамбованного образца реголита, то на поверхности Лу-

ны плотность равна 48%, на глубинах 10 см — 82%, 30 см — 93% и 60 см — 99% от максимальной.

Предварительная оценка механических свойств лунного грунта — прочности и характера деформации при вдавливании в него цилиндрического штампа — была сделана на небольшом образце, доставленном экспедицией «Аполлон-11», с помощью ручного пружинного пенетromетра в камере с атмосферой азота.

Испытания проводились при трех различных значениях плотности образца: $\rho = 1,36; 1,77$ и $1,80$ г/см³. При этом оказалось, что грунт при $\rho = 1,36$ г/см³ оказывает столь малое сопротивление пенетрации, что пружина пенетromетра не сжимается и погружение прибора происходит только под влиянием его веса, равного около 1,87 Н, на глубину от 0,63 до 1,95 см при площади индентора 0,32 см². Уплотненный грунт при $\rho = 1,77$ г/см³ уже выдерживает нагрузку от 1,87 до 10 Н при той же площади, а коэффициент постели, определяемый как отношение среднего давления под индентором к глубине его погружения, составляет от 7,2 до 12,4 Н/см³. В максимально уплотненном состоянии при $\rho = 1,8$ г/см³ коэффициент постели поднимается до 16,9—23,5 Н/см³. Последние два числа получены при площади индентора 2,68 см².

Как видно, плотность упаковки играет очень большую роль в несущей способности лунного грунта, что наблюдается и у зернистых грунтов Земли. Кроме того, замечено, что несущая способность сильно возрастает, если лунный грунт поместить в обойму, ограничивающую его боковые деформации, что также характерно для земных несвязных зернистых грунтов. При вдавливании пенетromетра в рыхло насыпанный лунный мелкозем с плотностью 1,36 г/см³ возникали четко очерченные цилиндрические лунки без повреждения окружающей поверхности. При внедрении того же пенетromетра в утрамбованный лунный грунт с плотностью 1,8 г/см³ вокруг лунок образовывались радиальные трещины. Такие же явления наблюдаются на земле при глубоком вдавливании штампов в рыхлый и плотный песок.

Следующая серия опытов проведена на грунте, который оставался в ковше манипулятора АЛС «Сервейер-3», доставленном экспедицией «Аполлон-12».

Для определения физических и механических свойств НАСА выделила Л. Д. Джаффе и Р. Ф. Скотту всего 1,3 г грунта из 6,5 г, которые случайно сохранились внутри ковша «Сервейера-3». Этот грунт подвергался воздействию атмосферного воздуха, и все его испытания также проводились в нормальных атмосферных условиях. Полученный образец не подвергался просеиванию или фракционированию, но немногочисленные зерна крупностью более 1 мм были отобраны вручную.

В статьях, опубликованных Л. Д. Джаффе [90] и Р. Ф. Скоттом [59], упоминаются три метода определения механических свойств этого образца: испытания на пенетрацию, в приборе

одноплоскостного сдвига и в приборе трехосного сжатия. Все приборы имели миниатюрные размеры, соответствующие малому объему образца.

Испытания на пенетрацию проводились с помощью вертикального винтового пресса. Чашка для образца диаметром 1,1 см и высотой 1,1 см была сделана из метилметакрилата. Рабочим органом служил цилиндрический вертикальный стержень диаметром 2 мм в нижней части. На расстоянии 5—9 мм от нижнего конца диаметр стержня сужался на 0,35 мм с тем, чтобы уменьшить трение его боковой поверхности о грунт. Стержень составлял одно целое с цилиндрическим бронзовым грузом. Последний был подвешен на тонкой проволоке к силоизмерительному устройству в верхней части пресса.

Испытание состояло во вдавливании стержня в массу грунта, находящегося в чашечке, с одновременной регистрацией глубины вдавливания и нагрузки. Опыты проводились при изменении плотности от 1,15 до 1,93 г/см³. Рыхлое состояние достигалось насыпанием грунта в чашечку, плотное — трамбованием или вибрированием. Для контроля высоты образца и обнаружения крупных пустот в его массе использовалась радиография. Опыты проводились в атмосфере воздуха при температуре 70° и относительной влажности 40—50%.

В ходе опыта механизм пресса поднимал чашечку с грунтом вертикально вверх со скоростью 2,1 мкм/с. Перемещение измерялось по нижней головке прибора, нагрузка — по уменьшению веса груза, подвешенного к верхней головке. В начале опыта силоизмеритель устанавливали на наибольшую чувствительность, при достижении предела отсчета по шкале подъем прекращали и переключали прибор на нужную чувствительность.

В результате опыта стержень проникал в глубину образца и в той или иной мере нарушал его поверхность. После каждого опыта образец осматривали и отмечали происшедшие изменения. В большинстве опытов по радиографическим данным образцы грунта были однородными.

При малой плотности образцов ($\rho \leq 1,62$ г/см³) стержень погружался без растрескивания или вспучивания окружающей поверхности. После того как плотность становилась более 1,62 г/см³, эти явления наблюдались во всех опытах. Радиография показала, что при испытании грунта с малым объемным весом под отверстием, созданным вдавливанием стержня, образуется цилиндрический вертикальный пыж из уплотненного грунта. После удаления стержня вертикальные стенки отверстия сохраняются, что говорит о наличии сцепления между зернами.

На рис. 6.22 представлены кривые вдавливания для четырех образцов разной плотности. Можно заметить, что при достижении глубины вдавливания, приблизительно равной одному диаметру стержня, сопротивление вдавливанию резко увеличивается. Поэтому среднее давление под пятой стержня при глубине

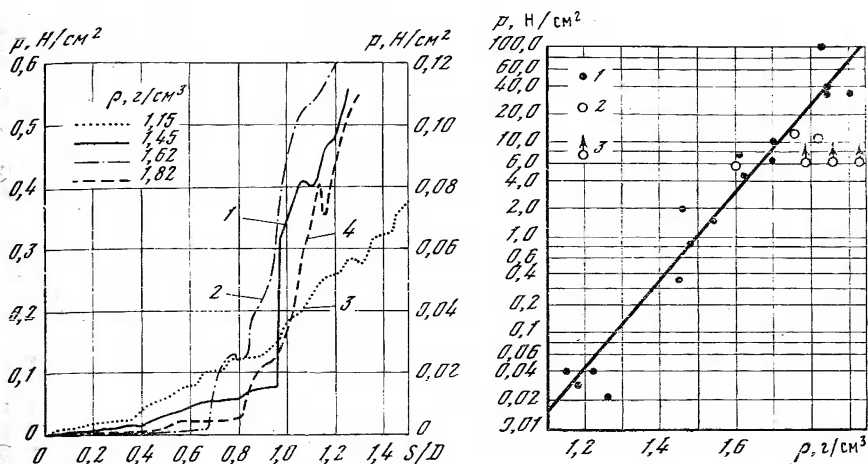


Рис. 6.22. Результаты пенетрации в пробе грунта, доставленной в ковше автоматической станции «Сервейер-3»

Сопротивление пенетрации p : 1 — по шкале слева; 2 — то же, уменьшено в 10 раз; 3 — по шкале справа; 4 — то же, уменьшено в 1000 раз

S/D — глубина вдавливания индентора в долях его диаметра

Рис. 6.23. Зависимость между плотностью реголита и его несущей способностью по результатам испытаний проб грунта, доставленного в ковше автоматической станции «Сервейер-3»

1 — прямое измерение; 2 — экстраполяция; 3 — экстраполяция, нижняя граница

вдавливания, равной диаметру стержня, принято в качестве меры несущей способности грунта. Оказалось, что несущая способность зависит от плотности грунта.

Соответствующий график представлен на рис. 6.23. Кривые на нем отличаются быстрым увеличением глубины вдавливания в начальный период нагружения, затем процесс замедляется. Причиной этому служит, по мнению американских специалистов, образование тонкого слоя пониженной плотности на поверхности более плотного грунта при подготовке образцов.

Испытания на одноплоскостной сдвиг сочетались с опытами по уплотнению грунта. Для проведения этих испытаний был сделан миниатюрный прибор с чашкой для образца диаметром 5 мм и высотой 5 мм. Верхняя и нижняя части чашки во избежание трения имели независимую подвеску. Нижняя часть могла перемещаться электромеханизмом со скоростью 4,7 мкм/с. Перемещение измерялось с точностью 2,5 мкм.

Сдвигающая сила, которая передавалась через образец на верхнюю половину чашки, измерялась электротензометром, причем получались кривые зависимости напряжения от времени и перемещения. Вертикальное давление создавалось грузом через:

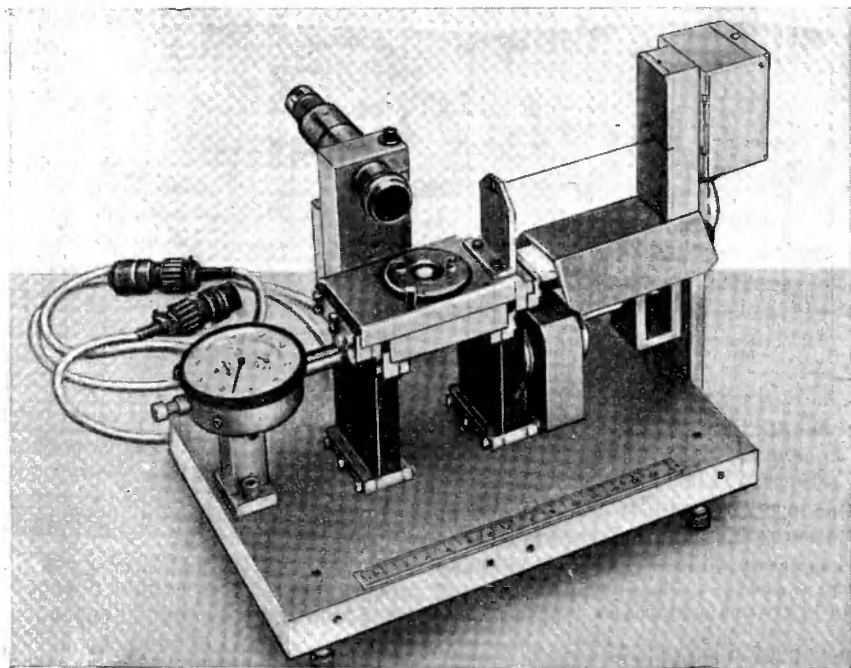


Рис. 6.24. Прибор одноплоскостного сдвига, использованный Л. Д. Джаффе

поршень и оставалось на протяжении каждого опыта постоянным. Положение поршня измерялось с помощью микроскопа и использовалось для вычисления объема и плотности образца. Масса лунного грунта в каждом опыте была равна 200 мг. Внешний вид прибора представлен на рис. 6.24.

Применялись пять разных методов зарядки прибора: свободная засыпка и выравнивание добавкой грунта, засыпка с помощью шпателя и выравнивание им же, набивка чашки шпателем отдельными порциями с нажимом, то же, с последующей пригрузкой $2,7 \text{ Н/см}^2$ после полного наполнения чашки, то же, с пригрузкой $2,7 \text{ Н/см}^2$ после укладки каждой порции грунта.

Наблюдения показали, что зарядка прибора двумя последними методами делала грунт практически несжимаемым. При первых трех методах он сохранял способность к сжатию под вертикальной нагрузкой.

На основании этих опытов Л. Д. Джаффе получил следующие данные о плотности реголита в естественном залегании, считая, что исходная плотность свежевывавшего реголита равна $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$, а уплотнение происходит под действием собственного веса: на глубине 20 см $\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$; на глубине 100 см $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$.

Таблица 6.9

Зависимость сцепления и угла внутреннего трения от плотности грунта по данным Л. Д. Джаффе [90]

Плотность, г/см ³	Сцепление, Н/см ²	Угол внутреннего трения, град
0,99	0,03	13
1,43	0,01	17
1,60	0,05	19
1,70	0,30	14
1,87	0,27	56

Таблица 6.10

Определение коэффициента сжимаемости α и модуля общей деформации E_0 по данным Р. Ф. Скотта [59]

Номер опыта	ε	$\Delta\varepsilon$	Δp_i , Н/см ²	α , см ² /Н	E_0 , Н/см ²
1а	0,684	0,043	0,70	0,0605	26,4
2а	0,854	0,095	1,40	0,0690	25,7
2б	0,759	0,340	0,34	0,0100	158,0
2в	0,728	0,020	5,8	0,0034	475,0

Реголит с первоначальной плотностью 1,4—1,6 г/см³ на глубине 50—100 см приобретает плотность 1,6—1,7 г/см³. Реголит с исходной плотностью 1,7 г/см³ до глубины 10 м под действием собственного веса уплотняться не должен.

Параметры сопротивления сдвигу также очень сильно зависят от метода зарядки прибора и плотности образцов. Сцепление и угол внутреннего трения сильно увеличиваются при увеличении плотности грунта (табл. 6.9).

Отмечается большой разброс экспериментальных данных, а также низкие значения сцепления у рыхлых образцов, которые получались даже меньше, чем у земных аналогов реголита.

Испытания в приборе трехосного сжатия (рис. 6.25) проводились Р. Ф. Скоттом на образцах диаметром 6 мм и высотой 12 мм, помещенных в резиновую оболочку, из которой откачивают воздух [59]. Боковое давление создается внешней атмосферой и может приближаться к 10 Н/см². Для учета масштабных факторов ведутся параллельные опыты с песком на миниатюрном приборе Скотта и стабилometре нормального типа с образцом диаметром 38 мм и высотой 76 мм. По предварительным данным размеры образца не отражаются на сопротивлении сдвигу.

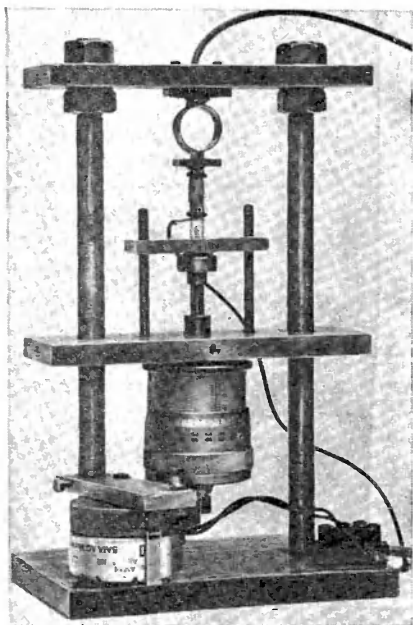


Рис. 6.25. Прибор трехосного сжатия, использованный Р. Ф. Скоттом

В одном из опытов с лунным грунтом плотность была доведена до $1,8 \text{ г/см}^3$, после чего угол внутреннего трения составил 45° , а сцепление — $0,59 \text{ Н/см}^2$.

По мнению Скотта, в земной атмосфере должны происходить конденсация водяного пара на зернах реголита, проникновение влаги внутрь микротрещин и изменение удельной поверхности грунта, что будет отражаться на его механических свойствах.

При стандартных испытаниях для определения механических свойств земных грунтов на компрессию и сдвиг в США применяются образцы сечением $40\text{--}60 \text{ см}^2$, высотой $2\text{--}4 \text{ см}$ и весом от $1,5$ до 5 Н . Из лунного грунта, привезенного в герметичном контейнере экспедицией «Аполлон-12», был выделен образец реголита об-

щим весом 2 Н специально для механических испытаний, который приближался по своим размерам к стандартным образцам.

С момента поступления в приемную лабораторию образец не подвергался действию атмосферного воздуха с давлением более $1 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$ Подготовка к испытанию велась при давлении $2 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$, испытания — при $5 \cdot 10^{-8} \text{ мм рт. ст.}$ Плотность минеральных зерен принята равной $3,1 \text{ г/см}^3$. Исходя из этой величины проводилось вычисление пористости при разной плотности образца. Опыты, по-видимому, велись в приборе одноплоскостного сдвига, который мог использоваться и для компрессионных испытаний.

При испытании образец плотностью $\rho = 1,84 \text{ г/см}^3$ с коэффициентом пористости $\epsilon = 0,684$ был испытан на сжатие в жесткой обойме (табл. 6.10), а затем на срез (табл. 6.11, опыт 1а). После этого образец был вновь уплотнен четырьмя ступенями нагрузок, последняя из которых превышала ранее достигнутый максимум вдвое, и вновь подвергнут срезу (табл. 6.11, опыт 1б). Затем грунт был заново уложен в прибор в рыхлом состоянии при $\rho = 1,67 \text{ г/см}^3$ и $\epsilon = 0,854$, обжат несколькими возрастающими ступенями давления и подвергнут испытанию на сдвиг (табл. 6.11, опыт 1а, 1б, 2).

Таблица 6.11
 Результаты определения сопротивления сдвигу по данным
 Р. Ф. Скотта [59]

Номер опыта	ε	σ , Н/см ²	$\tau_{\text{пред}}$, Н/см ²
1а	0,612	3,12	6,44
1б	0,550	6,99	7,14
2	0,708	3,57	5,29

В процессе проведения опытов отмечено выделение газов из образца.

Модуль общей деформации E_0 вычислен для среднего значения коэффициента Пуассона $\mu=0,2$.

По результатам этих опытов нельзя однозначно установить значения c и φ для различных значений ε . Однако косвенным путем найдено, что сцепление c изменяется в пределах от 0 до 0,07 Н/см², а угол внутреннего трения φ у рыхлого образца равен 27° и у плотного — 33—35°.

Параллельные опыты с молотым базальтом показали, что сопротивление сдвигу исследованного образца реголита составляет 67% сопротивления молотого базальта в одинаковых условиях.

ЗЕМНЫЕ АНАЛОГИ ЛУННЫХ ГРУНТОВ

7.1. Назначение грунтов-аналогов

В 1969 г. были доставлены на Землю первые образцы лунного грунта. Этим было положено начало исследованию лунных грунтов в лабораториях Земли. В настоящее время ученые Земли располагают более чем 380 кг лунных грунтов из девяти разных районов видимого полушария Луны. В будущем доставка таких образцов станет обычным явлением и человечество получит исчерпывающие данные о свойствах лунных грунтов разных областей Луны.

В такой ситуации может показаться, что подбор и изучение земных материалов, моделирующих те или иные свойства лунных грунтов, имеют только историческое значение. С течением времени, несомненно, так и случится. Однако громадная стоимость образцов вещества с Луны, малые количества доставляемых оттуда грунтов и трудности хранения и исследования их в глубоком вакууме будут ограничивать их использование в основном лабораторными анализами и опытами малых масштабов. Земные аналоги лунных грунтов еще долго сохраняют свое научное и практическое значение, в связи с чем в настоящей книге опыту исследований в этой области отводится определенное место.

Отработка и окончательные испытания посадочных устройств автоматических лунных станций и пилотируемых кораблей для полетов на Луну были бы невозможны без использования грунтов-аналогов, с помощью которых на Земле создавались условия, близкие к тем, которые могли встретиться при посадке на лунную поверхность. Такая практика себя целиком оправдала. К концу 1977 г. на Луну успешно совершили мягкие посадки 12 автоматических лунных станций типа «Луна» и «Сервейер» и 6 пилотируемых кораблей. Длительные рейсы по поверхности Луны провели советские автоматы «Луноход-1 и -2». Это свидетельствует о правильном выборе параметров лунных грунтов, принятых при расчете процессов соударения опор аппаратов с поверхностью Луны, и вполне оправдывает работы, проведенные в области подбора земных аналогов лунных грунтов для испытаний таких аппаратов. Земные аналоги находят применение при решении вопросов проходимости лунных транспортных средств и в США.

В настоящее время материалы, моделирующие лунные грунты в земных условиях, используются в различных целях. Главнейшие из них таковы.

1. Подбор грунтов-аналогов, соответствующих различным гипотезам о происхождении, составе и структуре лунных грунтов и данным, получаемым исследованием поверхности Луны с помощью космических аппаратов, астрономических и радиофизических средств для определения их механических свойств, сопротивления движению, буримости и других технических показателей, требующих проведения натурных испытаний.

2. Отработка одежды, обуви и снаряжения космонавтов, тренировка космонавтов в передвижении по поверхности, свойства которой приближаются к лунной, отработка конструкций и органов передвижения различных лунных транспортных средств.

3. Создание испытательных площадок, стендов и полигонов для натурных испытаний космических аппаратов и их посадочных устройств с воспроизведением лунного рельефа и микро-рельефа в нормальных земных условиях, т. е. при обычном атмосферном давлении и земном ускорении силы тяжести. Такие площадки и полигоны по необходимости должны иметь большие размеры, и создание их из подлинно лунных грунтов в вакуум-камерах, по-видимому, никогда не будет целесообразным.

4. Выявление экспериментальным путем особенностей поведения минеральных грунтов разного состава, структуры и плотности в глубоком вакууме, при лунном ускорении силы тяжести, под действием космической радиации в специально создаваемых испытательных камерах и установках.

5. Разработка и испытания конструкций буровых снарядов и средств для отбора проб лунного грунта в натуральную величину, которые требуют использования больших масс грунта.

Помимо перечисленных, можно было бы назвать еще ряд исследований физического и химического характера, выходящих за рамки настоящей книги и тоже требующих использования аналогов лунных грунтов. В будущем, вероятно, возникнет новая проблема разработки и испытаний механизмов для проведения строительных и дорожных работ на поверхности Луны.

В соответствии с данными, приведенными в главе 1, по-видимому, можно считать наиболее обоснованной ту гипотезу происхождения лунных морей, согласно которой они покрыты базальтовыми лавами, на которых лежит обломочный и зернистый слой с широким гранулометрическим спектром. В составе этого слоя могут быть плотные и пористые минеральные зерна и камни, а также слипшиеся и спекшиеся комки и агрегаты.

Поверхность лунных грунтов, которую мы видим на снимках прилунившихся станций, представляет собой каменистую россыпь. Крупные фракции и обломки выступают наружу, будучи частично погружены в толщу мелких минеральных частиц. Особенно сложный рельеф и микрорельеф поверхности харак-

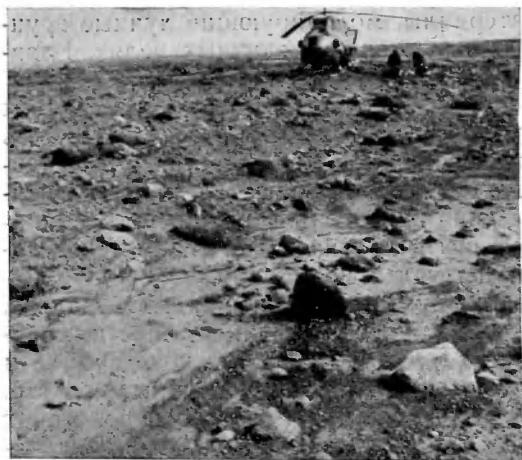


Рис. 7.1. Отложения направленного взрыва вулкана Безымянный на Камчатке (слева) и поверхность Луны, сфотографированная станцией «Сервейер» (справа)

терен для горных участков Луны. Тщательные поиски участков, которые могли бы на Земле ближе всего моделировать лунные по своему рельефу, микрорельефу и свойствам поверхностной толщи грунтов, показали, что наиболее подходящими являются районы, занятые современными вулканическими отложениями, которые еще не подверглись существенному влиянию процессов выветривания, эрозии и почвообразования.

Магматические породы в этих районах имеют много общего с лавой, заполняющей чаши лунных морей. Лежащие сверху рыхлые отложения являются продуктами взрывного и пирокластического измельчения этих пород, которое, конечно, отличается от ударного измельчения метеоритами, но тем не менее ближе к нему, чем другие процессы деструкции горных пород на Земле.

Поэтому поиски природных аналогов лунных грунтов на Земле начались в первую очередь среди вулканических отложений (рис. 7.1). Речь идет об аналогах по внешнему виду и рельефу ландшафтов и структурно-механическим свойствам грунтов. Назначение природных аналогов состояло главным образом в создании на них испытательных площадок и полигонов таких размеров, которые обеспечивали бы натурные испытания посадочных устройств и лунных транспортных средств. Оптические, электрические и поверхностно-активные свойства грунтов при этом почти не учитывались.

Вулканические породы были подобраны, всесторонне изучены и использованы при создании луноходов. Одновременно для

обеспечения стендовых и лабораторных испытаний был сделан подбор и проведено изучение твердых и зернистых материалов промышленного изготовления, которые также нашли практическое применение при разработке и тарировке различных механизмов и приборов, предназначенных для взаимодействия с грунтом Луны.

Подробные данные о природных и искусственных материалах, моделирующих лунные грунты, приводятся в трудах З. А. Ацагорцяна, И. И. Гущенко, В. И. Влодавца, К. Ибрагимова, Е. Ф. Малеева, В. В. Михеева, В. П. Петрухина, М. И. Смоудинова, И. И. Черкасова, В. В. Шварева, Г. С. Штейнберга [92—108] и цитированных в них работах других авторов. Объем настоящей книги не позволяет даже вкратце изложить полученные результаты. Поэтому, отсылая интересующихся деталями вопроса к источникам, мы ограничимся воспроизведением наиболее существенных данных о структурно-механических свойствах моделирующих грунтов и материалов, опубликованных ранее, и приведем результаты некоторых позднейших экспериментов.

7.2. Рыхлые вулканические отложения

К рыхлым отложениям относятся вулканический пепел, лапилли, пемза, шлак и обломки магматических скальных пород. Ближе всего к лунному реголиту стоят вулканические пеплы пылевато-песчаного гранулометрического состава, включающие в себя примесь крупнообломочного материала. Они отличаются острогранной формой зерен, высоким углом внутреннего трения, отсутствием сцепления в сухом состоянии и большим коэффициентом пористости в естественном залегании. При увлажнении появляется капиллярная связность, при уплотнении резко уменьшаются пористость и сжимаемость. Характернейшей особенностью рыхлых отложений является большая глубина погружения в них колес транспортных средств (рис. 7.2).

В полевых условиях с помощью малогабаритных штампов, установленных на вертолете, были проведены определения механических свойств рыхлых отложений на пяти камчатских вулканах [97, 99], в результате которых получены следующие данные (табл. 7.1).

В лабораторных условиях проводилось много опытов с рыхлыми вулканическими грунтами, результаты которых представлены в [94, 97]. В ходе лабораторных исследований особое внимание уделялось определению связи механических свойств с плотностью образцов. В качестве примера в табл. 7.2 представлены результаты испытания трех вулканических песков разного происхождения и состава, проведенных в 1974 г. в МИИТЕ

Таблица 7.1

Результаты полевых испытаний рыхлых вулканических грунтов

Место проведения испытаний	Грунт	Плотность, г/см ³	Влажность, %	Модуль общей деформации, Н/см ²
Вулкан Шивелуч (отложения эруптивной тучи)	Песок вулканический пылеватый	0,89	7,3	80
Вулкан Ключевской	Песок вулканический крупный	1,29	7,4	680
Вулкан Шивелуч (отложения пирокластического потока)	Дресва пемзовидная	1,07	10,6	910
Вулкан Плоский Толбачик	Дресва шлаковая	0,82	8,5	800
Вулкан Крашенинникова	Песок вулканический крупный	1,25	7,4	530

Примечание. Модуль общей деформации определен при давлении в подошве штампа $D=20$ см, равном 10 Н/см^2 .

Таблица 7.2

Механические свойства вулканических песков в рыхлом и плотном воздушно-сухом состоянии

Грунт	Плотность ρ , г/см ³	Коэффициент по- ристости, e	Угол внутреннего трения φ , град	Модуль общей дефор- мации E_0 , Н/см ² , при нагружении		Модуль упругости E , Н/см ² , при разгрузке от 50 Н/см ² до 0
				от 0 до 5 Н/см ²	от 0 до 50 Н/см ²	
Состояние грунта рыхлое						
Песок туфовый пылеватый, неоднородный	0,95	1,72	32	485	272	5980
Песок шлаковый мелкий, неоднородный	1,13	1,79	34	92	497	6800
Песок андезито-базальтовый пылеватый, неоднородный	1,3	1,36	27	47	313	7450
Состояние грунта плотное						
Песок туфовый пылеватый, неоднородный	1,31	0,87	42	1470	1952	9 600
Песок шлаковый мелкий, неоднородный	1,47	1,02	43	1910	2650	16 500
Песок андезито-базальтовый пылеватый, неоднородный	1,88	0,81	43	2030	2920	13 620

Н. Ф. Козловой, М. Г. Крайновой, В. И. Никитиной и И. И. Черкасовым.

Изучение вулканических отложений в полевых и лабораторных условиях показало, что их поверхностные слои отличаются малой плотностью, низкой несущей способностью и высокой сжимаемостью. Деформации под нагрузкой носят преимущественно остаточный характер и не распространяются в стороны от загруженной площади. Упругие деформации при разгрузке очень малы.

Вулканические пеплы базальтового и андезито-базальтового состава близки по механическим свойствам к реголиту. Пески шлакового и туфового состава отличаются наличием пор внутри зерен и малой прочностью зерен. Мелкие зерна пор не содержат.

Уплотнение коренным образом меняет механические свойства вулканических отложений. Сжимаемость уменьшается в несколько раз и несущая способность растет. Влажность влияет двояким образом. Увлажненные грунты приобретают сцепление и способность комковаться, благодаря чему при свободном насыпании образуют чрезвычайно рыхлые отложения. Но в плотном состоянии капиллярно-влажные вулканические пески и пеплы представляют собой достаточно прочные грунты, связность которых превышает связность реголита.



Рис. 7.2. Глубокое погружение колеса вертолета МИ-4 на рыхлых отложениях вулкана Шивелуч на Камчатке

7.3. Скальные вулканические породы

Подробные комплексные исследования скальных вулканических пород были сделаны З. А. Ацагорцяном и его сотрудниками [102, 103]. Наибольший интерес представляют породы группы базальта — плотные и прочные, залегающие большими массами или в виде обломков, а также вулканические туфы. Последние отличаются высокой пористостью и меньшей прочностью. В среднем плотность пород базальтовой группы равна $2,36 \text{ г/см}^3$, предел прочности на сжатие около 9 кН/см^2 . У туфов плотность $1,5 \text{ г/см}^3$ и прочность на сжатие 2 кН/см^2 .

В 1974 г. Н. Ф. Козловой, М. Г. Крайновой, В. И. Никитиной и И. И. Черкасовым в МИИТе были проведены комплексные исследования четырех скальных вулканических пород из Армении с определением основных механических параметров, результаты которых представлены в табл. 7.3. В этих опытах особое внимание уделялось пористым скальным породам, которые встречаются на Луне наряду с плотными. Как видно из таблицы, пористость сильно влияет на сцепление и прочность на сжатие и растяжение исследованных пород, в то время как внутреннее трение от нее почти не зависит.

Базальтовые и андезито-базальтовые породы являются аналогами вулканических выбросов, которые вполне вероятны на Луне, а также в какой-то мере аналогами спекшихся под действием ударов метеоритов дисперсных пород Луны.

7.4. Искусственные материалы-аналоги

Природным материалам, рассмотренным выше, свойственны большая неоднородность, случайный состав компонентов и фракций, затруднительность подбора материалов с заранее заданными свойствами. Эти недостатки значительно меньше проявляются при использовании искусственных материалов промышленного изготовления. К ним относятся строительные и теплоизоляционные материалы — бетон различного состава и плотности, пеностекло, аглопоритовый и вспученный перлитовый песок и дресва, а также бинарные смеси кварцевого и вспученного перлитового песка.

Тяжелый бетон моделирует скальные породы базальтового типа, пенобетон и газобетон — пористые породы типа вулканического туфа, пеностекло — аналог пемзы и шлака (рис. 7.3).

Аглопоритовый и вспученный перлитовый песок моделируют легкие сыпучие отложения, отличающиеся очень малой плотностью, а их смеси с обычным кварцевым песком могут моделировать по плотности реголит в разном состоянии.

Разумеется, речь идет только о моделировании механических свойств. Химический и минералогический состав искусственных материалов (за исключением молотого базальта) не соответст-

Т а б л и ц а 7.3
Механические свойства вулканических скальных пород

Порода	Плотность, г/см ³	Кoeffи- циент пористости	Пределы прочности, Н/см ²		Угол внутрен- него трения, град	Сцепление, Н/см ²
			на сжатие	на растя- жение		
Туф высокопористый	1,57	1,78	1 640	240	46,5	320
Базальт высокопористый	2,02	0,56	3 480	490	46,5	700
Базальт пористый	2,08	0,47	3 570	650	44	750
Андезито-базальт низкопористый	2,72	0,02	22 400	2370	51	5500

Т а б л и ц а 7.4
Механические свойства воздушно-сухих зернистых искусственных материалов-аналогов

Материал	Плотность, г/см ³	Кoeffи- циент пористости	Модуль общей деформации, Н/см ²	Угол внутрен- него трения, град	Сцепление, Н/см ²
Состояние рыхлое					
Дресва аглопоритовая	1,05	0,79	33	—	—
Песок перлитовый вспученный	0,10	24	55	—	—
Песок базальтовый пылеватый	1,35	1,15	52		
Состояние плотное					
Дресва аглопоритовая	1,25	0,50	178	32	0
Песок перлитовый вспученный	0,16	14,7	240	35	1,2
Песок базальтовый пылеватый	1,87	0,55	1400	36	1,5

вует составу лунных пород. Но это не мешает моделированию процессов деформации и разрушения грунтов под действием посадочных устройств, движителей лунных транспортных средств и орудий для разработки грунтов и скальных пород.

Детальные исследования искусственных материалов-аналогов были выполнены Н. М. Зобачевым, К. Ибрагимовым, В. В. Михеевым, В. П. Петрухиным и И. И. Черкасовым и подробно освещены в работах [94, 98, 107—109]. В главе 8 будут рассмотрены некоторые из них, причем главное внимание будет уде-

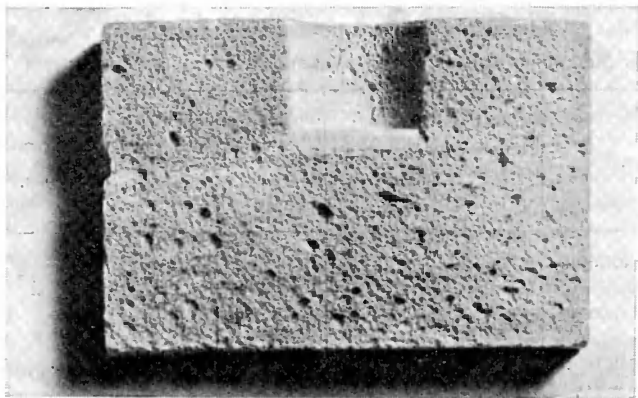


Рис. 7.3. Образец искусственного материала — пеностекла, распиленный после глубокого вдавливания в него жесткого штампа

Виден местный характер больших остаточных деформаций с полной деструкцией исходного пористого материала и образованием пылевой пробки

лено зернистым материалам. Для того чтобы дать представление о свойствах материалов аналогов промышленного изготовления, в табл. 7.4 и 7.5 приводятся их основные параметры.

Из таблиц видно, что искусственные материалы представляют возможность моделировать лунные породы в чрезвычайно широком спектре структур и механических свойств — от твердых скальных до предельно разрыхленных зернистых с плотностью от 0,1 до 2,4 г/см³ и модулем деформации от 33 до 1400 Н/см².

Увлажняя сыпучие материалы и придавая им способность комковаться, можно создавать очень рыхлые образцы. Комбинируя легкий вспученный перлитовый песок с обыкновенным кварцевым или тяжелым песком, приготовленным путем размола базальта, можно создавать композиции весьма различной плотности. Исследование этих вопросов проведено И. И. Черкасовым, Ю. И. Ковалевым и Ж. Е. Рогаткиной [110]. Из резуль-

Таблица 7.5

Механические свойства воздушно-сухих твердых искусственных материалов-аналогов

Материал	Плотность, г/см ³	Призмная прочность, Н/см ²	Модуль сжатия, Н/см ²	Коэффициент Пуассона
Тяжелый бетон марки «300»	2,4	1700	3 100 000	0,20
Газобетон марок «35» — «100»	0,6—1,0	200—570	170 000—500 000	0
Пеностекло	0,24	60	—	0

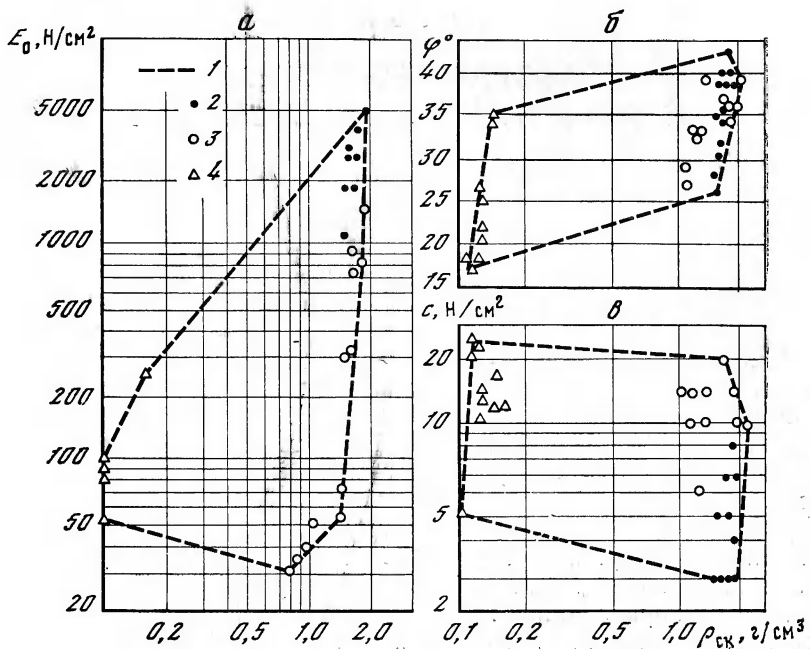


Рис. 7.4. Зависимость механических параметров сыпучих материалов различного происхождения и состава от их плотности $\rho_{ск}$

a — для модуля общей деформации E_0 ; b — для угла внутреннего трения φ ; c — для сцепления c ; 1 — границы исследований; 2 — молотый базальт; 3 — кварцевый песок по СНиП; 4 — вспученный перлитовый песок

татов (рис. 7.4) видно, насколько различными свойствами обладают при разной плотности исследованные материалы.

Очевидно, смешивая их в тех или иных соотношениях, можно приготовить смеси, механические свойства которых отображались бы точками внутри штриховых многоугольников, нанесенных на рис. 7.4. Тем самым создается возможность проводить опыты в таком широком диапазоне плотности и механических свойств, которые совершенно недостижимы при использовании как природных грунтов, так и искусственных сыпучих материалов без смешивания их с другими.

Особый интерес представляют легкие смеси с объемным весом порядка 0,0025—0,0030 Н/см³, который свойствен реголиту в условиях его природного залегания на Луне. С такими смесями можно проводить опыты, не прибегая к сложной процедуре испытаний в летающей лаборатории или в падающих контейнерах. Использование природных и искусственных грунтов-аналогов, вызванное к жизни исследованиями Луны, является одной из отличительных особенностей лунного грунтоведения.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ОПЫТЫ С АНАЛОГАМИ ЛУННЫХ ГРУНТОВ

8.1. Моделирование процессов образования стеклянных шариков в реголите

В пробе реголита, доставленной «Луной-16», были обнаружены две группы силикатных сферических частиц крупностью от 0,05 до 5 мкм и от 40 до 480 мкм. К. П. Флоренский и его сотрудники в ГЕОХИ АН СССР [111] установили, что в крупных фракциях реголита содержится 1—2% сферических частиц, а в мелких — 3—4%. Встречаются частицы правильной сферической формы, эллипсоидные, каплевидные и гантелевидные (рис. 8.1). Стеклянные шарики присутствуют и в образцах реголита, доставленных экспедициями «Аполлон». Правильные шарики, по видимому, образовались из расплава под действием сил поверхностного натяжения, а гантелевидные — при быстром охлаждении крупных капель в процессе их распада на более мелкие. По внешнему виду шарики, содержащиеся в реголите, стеклянные. Они не встречаются в земных грунтах и характерны только для реголита.

В работе [112] приводятся уравнения распределения частиц. Для частиц крупностью 40—480 мкм наблюдается степенной закон

$$\Delta N(D) = KD^{\alpha},$$

где D — диаметр частицы, $\Delta N(D)$ — число частиц крупнее D , $\alpha = -3,9$, K — постоянный коэффициент.

Распределение частиц крупностью 0,05—5 мкм имеет максимум в районе $D=0,4$ мкм. Слева и справа от максимума распределение описывается степенным уравнением

$$\Delta N(D) = KD^{\beta},$$

где $\beta = -1,3$ в интервале $0,05 < D \leq 0,4$ мкм, $\beta = 0,8$ в интервале $0,4 < D \leq 5$ мкм.

Разные законы распределения обеих групп сферических частиц указывают на возможность образования их под влиянием разных процессов.

Для проверки этого предположения М. Д. Нусинов и Ю. Б. Черняк [113, 117] провели лабораторные опыты по получению в вакууме стеклянных шариков двумя разными путями:



Рис. 8.1. Стекланные шарики в массе реголита

воздействием лазерных импульсов на твердую мишень из базальта и разбрызгиванием расплавленного базальта газовой струей. Схемы использованных ими вакуум-камер представлены на рис. 8.2 и 8.3.

Первая камера (рис. 8.2) была оборудована мощными лазерами, под действием которых на твердых базальтовых частицах возникали кратеры, сходные с теми, которые видны на некоторых частицах реголита. При этом происходил выброс вещества, содержащего шарики крупностью от 1 до 10 мкм. Независимо от мощности импульса, которая соответствовала энергии удара микрометеорита массой от 10^{-6} до 10^{-4} г, стекланные шарики имели примерно одну и ту же крупность. Из них 92% имели диаметр 1—5 мкм, 7% — 5—10 мкм и 1% — 10—20 мкм.

Во второй камере (рис. 8.3) был установлен тигель с электронагревателем, в котором плавился базальт. Снизу в тигель подавался сжатый гелий, который, прорываясь на поверхность, вызывал разбрызгивание расплава, в результате чего возникали шарики, соответствовавшие по крупности сферическим частицам второй группы в лунном реголите.

На основании опытов М. Д. Нусинов и Ю. Б. Черняк пришли к выводу, что при формировании реголита на Луне мельчайшие силикатные сферы образуются под действием высокоскоростных (км/с) метеоритных процессов, а более крупные — при низкоскоростных (м/с) процессах магматического характера.

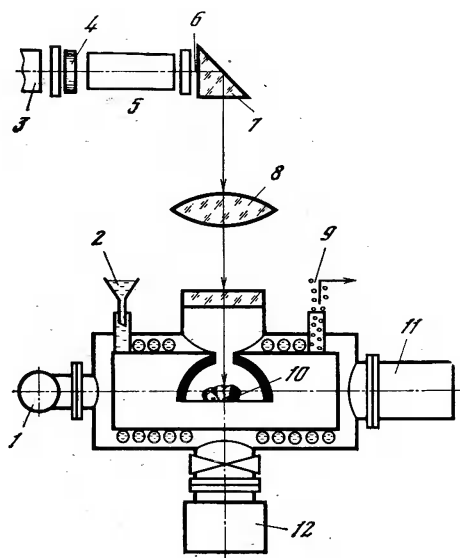


Рис. 8.2. Вакуум-камера, оборудованная лазерами

1 — вакуум-насос; 2 — жидкий азот; 3 — непрерывный лазер; 4 — оптический затвор; 5 — импульсный лазер; 6 — оптическое окно; 7 — призма; 8 — линза; 9 — газообразный азот; 10 — базальтовая мишень; 11 — масс-спектрометр; 12 — вакуум-насос

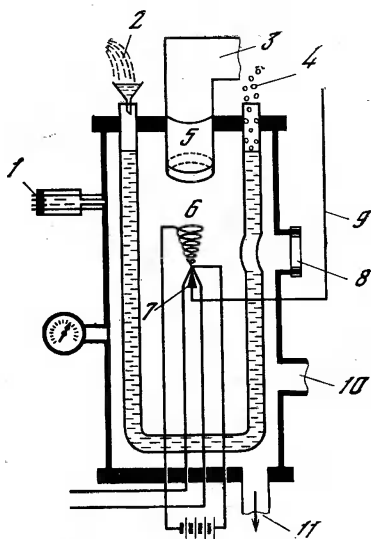


Рис. 8.3. Вакуум-камера с тиглем для распыления расплавленного базальта

1 — датчик масс-спектрометра «Омегаатрон»; 2 — жидкий азот; 3 — датчик масс-спектрометра «Хроматрон»; 4 — газообразный азот; 5 — мишень; 6 — тигель; 7 — термопара; 8 — оптический люк; 9 — газообразный сжатый гелий; 10, 11 — к вакуум-насосу

8.2. Структура и механические свойства сыпучих материалов, содержащих угловатые и сферические зерна

Обнаружение стеклянных шариков в составе реголита выдвинуло ряд вопросов, относящихся к структуре и свойствам сыпучих грунтов, состоящих из смеси угловатых и сферических зерен.

Возможно ли стабильное существование смеси сферических и угловатых зерен без тенденции к расслоению компонентов и если возможно, то при каком соотношении компонентов и их крупностей? Как отражается содержание шариков в смеси на ее способности к уплотнению? Каковы механические свойства смесей и существуют ли оптимальные по плотности и механическим свойствам. Как отразится присутствие шариков на взаимодействии грунтов с различными механизмами?

Известно, что форма зерен влияет на число контактов и механическое зацепление между ними, обуславливает напряжения

в контактах и в конечном счете определяет при прочих равных условиях механические свойства сыпучего грунта. Форма зерен, в частности, влияет на способность сыпучего грунта к уплотнению, а плотность сыпучего грунта является главным фактором, от которого зависят его сжимаемость и сопротивление сдвигу.

Материал с одинаковым минералогическим составом и крупностью зерен может обладать при одинаковой плотности разными механическими свойствами в зависимости от того, какая часть зерен будет иметь угловатую, а какая округленную форму. По этой причине, например, острогранные горные пески имеют более высокий угол трения, чем речные с окатанными зернами. Однако количественных данных по вопросу о влиянии примеси сферических зерен на механические свойства сыпучего грунта известно пока немного. Некоторые интересные сведения можно найти в работах [114—117].

Ниже будут описаны исследования физико-механических свойств сыпучих материалов, состоящих из смеси сферических и угловатых зерен в разных соотношениях, проведенные специально для того, чтобы получить количественные характеристики их гранулометрии, плотности, сжимаемости и сопротивления сдвигу при разной плотности.

Исследования велись в два этапа. На первом из них проводилось предварительное изучение крупнозернистых смесей, легко доступных визуальному исследованию, с целью определения основных закономерностей смешивания и создания оптимального соотношения зерен, при котором исключается расслоение и достигается наибольшая плотность упаковки. На втором этапе проводились исследования на мелкозернистых смесях, имитирующих по своему гранулометрическому составу мелкий и пылеватый песок.

В предварительных исследованиях, выполненных в 1974 г. в МИИТе А. Е. Мерзликиным и И. И. Черкасовым, использовался мелкогравийный материал в виде твердых матовых шариков из алюмосиликата, применяющихся в химической промышленности. Шарик имел диаметр от 3,0 до 4,5 мм. Многие из них имели неправильную форму, а поверхность их была покрыта микротрещинами. Путем механического дробления шариков была получена крупка из острогранных и остроугольных зерен размерами 0,1—3,0 мм. Эта крупка использовалась затем в качестве второго компонента при составлении смесей.

Зерна содержат от 10 до 25% Al_2O_3 и от 90 до 75% SiO_2 . Они обладают внутренней пористостью, благодаря которой легко впитывают воду. Накопление капиллярной влаги в пустотах между зернами становится возможным лишь после того, как все внутренние микропоры заполняются водой. Плотность сухих зерен $\rho^{\text{сух}} = 1,46 \text{ г/см}^3$, а водонасыщенных $\rho^{\text{вн}} = 1,90 \text{ г/см}^3$. Первые же попытки составления смесей показали, что зерна

крупки размерами от 1 до 3 мм плохо смешиваются с шариками исходного материала диаметром 3—4,5 мм, получить стабильный материал с максимально плотной упаковкой нельзя и смесь разделяется на компоненты при пересыпании и вибрации. Поэтому дальнейшие опыты проводились со смесью шариков диаметром 4,5—3,0 мм с крупкой размерами 1—0,1 мм, которая могла размещаться в порах между шариками, не препятствуя их контактам между собой.

В опытах с мелкогравийным материалом было проведено определение:

- влияния соотношения между содержанием сферических и угловатых зерен на плотность смеси;

- угла естественного откоса воздушно-сухой смеси при разном соотношении компонентов;

- сжимаемости воздушно-сухой смеси оптимального состава.

Результаты определения наружной пористости смесей в рыхлом воздушно-сухом состоянии при свободном насыпании и плотном, после уплотнения постукиванием, представлены на рис. 8.4. Оказалось, что наибольшая плотность смеси достигается при содержании в ней 65% шаров и 35% угловатых зерен по весу.

Результаты определения угла естественного откоса также показаны на рис. 8.4. Как видно, при содержании в смеси 100% шаров угол естественного откоса минимален и равен 32° , при полном отсутствии их он возрастает до 36° . Однако максимум в $39^\circ 45'$ достигается при содержании шаров 55%, т. е. при близком к оптимальному по плотности составу смеси.

Сжимаемость смеси оптимального состава определялась при исходном рыхлом насыщенном состоянии, которому соответствовал коэффициент наружной пористости смеси $\epsilon_{\text{нар}} = 0,74$. Нагрузка прикладывалась ступенями по 2 Н/см^2 с выдержками до полной стабилизации по 2 мин с последующей разгрузкой в конце опыта. Компрессионные кривые представлены на рис. 8.5. Они свидетельствуют о весьма высокой сжимаемости исходного свободно насыпанного материала, которая закономерно уменьшается при увеличении нагрузки на образец.

Таким образом, показано, что присутствие шариков приводит к увеличению плотности смеси. Имеется оптимальное соотношение содержания шариков и угловатых зерен (65:35), при котором достигается наибольшая плотность, а также высокий угол естественного откоса. Компрессионная кривая такой смеси имеет обычный вид.

Дальнейшие опыты проведены Н. Ф. Козловой, В. И. Никишиной и И. И. Черкасовым [118] с совершенно иными материалами, а именно со стеклосферами и стеклокрупкой, которые по своей гранулометрии соответствуют песку и пыли.

Стеглосферы изготовляются в промышленности методом оплавления стеклокрупки из тяжелого свинцового стекла плотностью 7,15 г/см³. Крупка состоит из остроугольных и острогранных зерен со стеклянным блеском. Стеглосферы представляют собой шарики правильной формы с гладкой блестящей поверхностью.

Описываемые ниже опыты проводились со стеклокрупкой с зернами 15—40 мкм и стеклосферами диаметром 101—125 мкм,

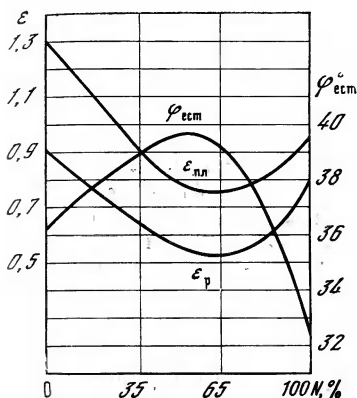


Рис. 8.4. Влияние примеси сферических частиц N на коэффициент наружной пористости рыхлой смеси ε_p , коэффициент наружной пористости уплотненной смеси $\varepsilon_{\text{пл}}$ и угол естественного откоса рыхлой смеси $\varphi_{\text{ест}}$

Мелкогравийный алюмосиликатный материал

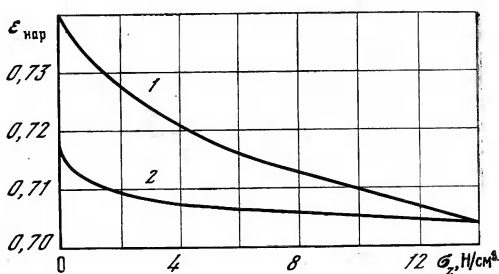


Рис. 8.5. Зависимость между вертикальным сжимающим напряжением σ_z и коэффициентом наружной пористости $\varepsilon_{\text{нар}}$ мелкогравийного алюмосиликатного материала при компрессионном испытании

1 — нагружение; 2 — разгрузка

а также их смесями, содержащими 35% стеклосфер и 65% крупки или 65% стеклосфер и 35% крупки.

Соотношение между размерами частиц и их содержанием в смесях было принято на основании результатов предварительных опытов, описанных выше. Смесь с 65% стеклосфер близка к оптимальной. На рис. 8.6, сделанном по снимку на сканирующем электронном микроскопе, видно, что при таком составе смеси стеклосферы соприкасаются между собой, а мелкие зерна крупки заполняют пустоты между ними, обеспечивая максимальное число контактов и стабильность смеси. Смесь с 35% стеклосфер нестабильна и представляет собой антипод предыдущей.

Большая часть опытов проводилась при воздушно-сухом состоянии материалов, которое устанавливалось самопроизвольно при длительном хранении и работе в нормальных лабораторных условиях. Рыхлое состояние достигалось свободным медленным насыпанием с высоты 2—3 см в стакан, плотное — 20-кратным постукиванием по стенкам стакана.

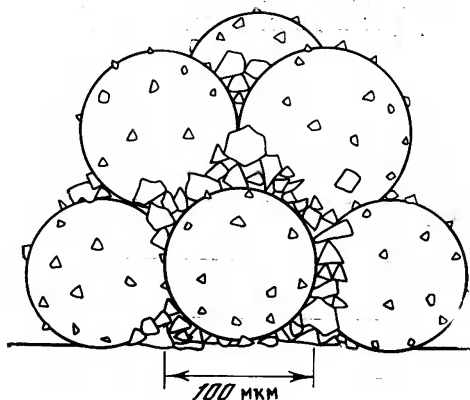


Рис. 8.6. Структура смеси, состоящей из 65% стеклосфер крупностью 100—125 мкм и 35% стеклокрупки 15—40 мкм

Способность материала к уплотнению характеризовалась коэффициентом уплотнения

$$\delta = (\varepsilon_p - \varepsilon_{пл}) / \varepsilon_p,$$

где ε_p , $\varepsilon_{пл}$ — коэффициенты пористости рыхлого и плотного материалов.

Данные, характеризующие гранулометрический состав, влажность и плотность всех исследованных материалов, представлены в табл. 8.1. Из таблицы видно, что коэффициент пористости стеклосфер в 2—3 раза меньше, чем у стеклокрупки, он мало меняется при уплотнении и коэффициент уплотнения стеклосфер $\delta = 0,189$ очень мал. Коэффициент уплотнения стеклокрупки в 2,5 раза больше, чем у стеклосфер. Именно присутствием крупки в порах между сферами определяется значение δ у смесей.

Коэффициенты уплотнения смесей близки к максимальному значению для стеклокрупки, и примесь стеклосфер не способствует самопроизвольному уплотнению при насыпании без постукивания. Однако чем больше стеклосфер содержит смесь, тем выше ее плотность как в рыхлом, так и в уплотненном состоянии.

Влажность, очень малая по абсолютной величине, в воздушно-сухом состоянии у стеклокрупки в 5 раз больше, чем у стеклосфер, что объясняется большей удельной поверхностью крупки.

Результаты механических испытаний представлены в табл. 8.2, 8.3. Рассмотрим вначале свойства материалов и сме-

Таблица 8.1

**Физические свойства стеклокрупки, стеклосфер и их смесей
в воздушно-сухом состоянии**

Содержание	Крупность зерен, мкм	Влажность, %	Коэффициент пористости		Коэффициент уплотнения δ
			ϵ_p	$\epsilon_{пл}$	
Стеклокрупка	15—40	0,05	2,37	1,186	0,500
Смесь: 35% стеклосфер, 65% стеклокрупки	15—125	0,02	1,383	0,694	0,490
Смесь: 65% стеклосфер, 35% стеклокрупки	15—125	0,02	1,043	0,546	0,473
Стеглосферы	101—125	0,01	0,831	0,674	0,189

Таблица 8.2

Механические свойства воздушно-сухих стеклокрупки, стеклосфер и их смесей

Материал	Коэффициент относительной сжимаемости a_0 , см ² /Н, при		Угол естественного откоса $\Phi_{ест}$, град	Угол внутреннего трения ϕ	Сцепле- ние с, Н/см ²	Удельное сопро- тивле- ние пе- нетра- ции, $R_{п.}$, Н/см ²
	нагрузке	разгрузке				

Состояние рыхлое

Стеклокрупка	0,0195	0,00043	36	28°	0,35	—
Смесь: 65% стеклокрупки, 35% стеклосфер	0,0159	0,0006	40	27°30'	0,15	—
Смесь: 35% стеклокрупки, 65% стеклосфер	0,0119	0,00035	38	23 20	0,10	—
Стеглосферы	0,0018	0,0003	25	22 40	0,10	—

Состояние уплотненное

Стеклокрупка	0,00183	0,00051	—	35	0,55	3,05
Смесь: 65% стеклокрупки, 35% стеклосфер	0,0008	0,00025	—	37	0,40	2,11
Смесь: 35% стеклокрупки, 65% стеклосфер	0,00062	0,0002	—	32 30	0,25	1,35
Стеглосферы	0,0004	0,00018	—	22 50	0,20	0,19

сей в рыхлом состоянии. Из табл. 8.2 видно, что коэффициент сжимаемости при нагружении $a_{0 \text{ нагр}}$ наиболее высок у стеклокрупки. Он уменьшается с увеличением содержания стеклосфер в смеси и принимает минимальное значение у чистых стеклосфер. То же относится к коэффициенту сжимаемости при разгрузке

Таблица 8.3

Свойства стеклокрупки, стеклосфер и их смесей в воздушно-сухом состоянии

Физические свойства				Механические свойства			
Средняя крупность зерен, мкм	Влажность, % от веса скелета	Коэффициент пористости		в рыхлом состоянии		в плотном состоянии	
		в рыхлом состоянии	в плотном состоянии	Угол внут- реннего трения, град	Сцепление, Н/см²	Угол внут- реннего трения, град	Сцепление, Н/см²
Стеклокрупка							
28	0,05	2,37	1,19	28	0,35	35	0,55
57	0,03	1,50	0,84	33	0,40	39	0,50
87	0,02	1,24	0,77	32	0,25	37	0,30
175	0,01	1,08	0,70	31	0,40	37	0,25
Стеклокрупка (средние значения)							
87	0,02	1,50	0,83	31	0,28	37	0,45
Стеглосферы							
28	0,05	0,83	0,68	24	0,05	31	0,10
52	0,03	0,83	0,68	22	0,10	28	0,20
72	0,02	0,83	0,68	23	0,05	27	0,20
91	0,01	0,83	0,67	22	0,10	27	0,20
113	0,01	0,83	0,67	23	0,10	27	0,20
Стеглосферы (средние значения)							
71	0,02	0,83	0,68	23	0,08	28	0,18
Смесь: 65% стеклосфер, 35% стеклокрупки							
28	0,02	1,043	0,546	23	0,1	32	0,25
113							

α_0 разгр, но абсолютные значения последнего в несколько раз ниже.

Угол естественного откоса у стеклокрупки в 1,5 раза больше, чем у стеклосфер. У смесей он еще несколько возрастает. Угол естественного откоса больше угла внутреннего трения, что говорит о наличии некоторого сцепления между зернами, которое особенно выражено у стеклокрупки и почти не проявляется у стеклосфер. Угол внутреннего трения, наиболее высокий у крупки, уменьшается при увеличении содержания стеклосфер и минимален у чистых стеклосфер. То же относится и к сцеплению.

Удельное сопротивление пенетрации у рыхлых материалов, определявшееся с помощью конуса Васильева, практически отсутствует.

Перейдем теперь к плотным материалам. Прежде всего надо отметить резкое снижение коэффициента относительной сжимаемости при нагружении по сравнению с рыхлым состоянием. Этот коэффициент уменьшается при увеличении содержания стеклосфер и достигает минимума у чистых стеклосфер.

Угол внутреннего трения в противоположность всем остальным показателям достигает максимума у смеси с 35% стеклосфер. У стеклокрупки и смесей он значительно больше, чем в рыхлом состоянии, а у стеклосфер тот же самый. Сцепление плотных материалов выше, чем рыхлых. Оно уменьшается вместе с увеличением содержания стеклосфер. У плотных материалов отмечается наибольшее сопротивление пенетрации, которое снижается при увеличении содержания стеклосфер.

Наблюдения, сделанные в ходе экспериментов при приготовлении и выборочных испытаниях смесей, показали, что присутствие стеклосфер начинает сказываться на механических свойствах смеси после того, как их содержание превысит примерно 6%. До этого отдельные шарики, разбросанные в массе стеклокрупки, влияют только на некоторое увеличение объемного веса.

В лунном реголите шариков мало, и на его механические свойства они не должны оказывать существенного влияния. Однако присутствие относительно крупных шариков в массе мелких угловатых зерен может сказаться на взаимодействии реголита с различными механизмами.

В некоторых случаях шарики могут вызвать резкое снижение трения между реголитом и металлическими поверхностями и явление проскальзывания. В других же попадание крупных твердых шариков в различные узкие зазоры может привести к заеданию механизмов.

8.3. Моделирование сцепления лунного реголита в экспериментах с его аналогами в атмосфере Земли

В зависимости от состава и плотности лунный реголит в природном залегании обладает следующими значениями параметров сопротивления сдвигу:

Угол внутреннего трения φ , град	10—45
Сцепление c , Н/см ²	0,01—0,40

Угол внутреннего трения в указанных пределах имеют многие земные аналоги реголита, и моделировать его нетрудно. Сцепление же в реголите обусловлено прямым молекулярным взаимодействием чистых минеральных поверхностей в глубоком вакууме, и воспроизвести его в обычных атмосферных условиях

Таблица 8.4

**Влажность стеклокрупки, стеклосфер и их смесей в процентах
от веса скелета**

Материал	Воздушно-су- хое состояние	Полная гигро- скопическая влагоемкость	Оптимальная влажность
Стеглосферы средней крупности, 113 мкм	0,05	0,25	6,0
Стеглосрупка средней крупности, 28 мкм	0,05	0,37	8,0
Смесь: 65% стеклосфер, 35% стекло- крупки	0,02	0,31	3,5

можно только путем подмены сил Ван-дер-Ваальса в контактах зерен на какие-либо иные.

Проще всего использовать сцепление, возникающее при увлажнении минеральных зерен за счет сил поверхностного натяжения воды в менисках, образующихся вокруг контактов. Такое — капиллярное — сцепление в абсолютно сухом грунте равно нулю. Оно равно нулю и при полном насыщении пор водой, когда мениск исчезает. Но при некоторой оптимальной влажности оно достигает максимума.

Меняя влажность грунта-аналога, можно добиться того, что его сцепление будет сравнимо по величине с приведенными выше значениями сцепления реголита. После этого можно проводить различные опыты в земных условиях, следя за тем, чтобы грунт-аналог не высыхал и не поглощал дополнительной влаги из воздуха. Это вполне осуществимо при работе в лаборатории с кондиционированием воздуха.

Для выяснения влияния влажности на механические свойства земных аналогов реголита в 1974 г. Н. Ф. Козловой, В. И. Никитиной и И. И. Черкасовым [118] были проведены опыты с аналогами реголита, состоящими из стеклосфер, стеклокрупки и их смесей, физические характеристики которых приведены в левой части табл. 8.3.

В ходе исследований все материалы изучались в рыхлом и плотном состояниях, причем основная часть опытов проводилась с воздушно-сухими материалами.

Воздушно-сухое состояние устанавливалось самопроизвольно при длительном хранении образцов в нормальных лабораторных условиях. Полное насыщение достигалось поглощением образцами влаги из воздуха с влажностью 99% и температурой 17°С в течение от 5 до 15 суток до тех пор, пока образцы не приобретали постоянного веса. Оптимально влажное состояние, при котором достигалась наибольшая капиллярная связность, соответствовало влажности, при которой устанавливалось мак-

симальное удельное сопротивление пенетрации. Испытания на пенетрацию проводились конусом Васильева при постоянном объемном весе скелета и постепенном увеличении влажности от воздушно-сухого до оптимально влажного состояния и далее до насыщения.

Результаты определения характерных влажностей приводятся в табл. 8.4.

Основные механические испытания состояли в определении сопротивления сдвигу на приборе одноплоскостного среза при вертикальном сжимающем напряжении от 2 до 6 Н/см². Результаты испытаний воздушно-сухих материалов представлены в правой части табл. 8.3.

Рассмотрим прежде всего данные по стеклокрупке, угловатые зерна которой ближе по форме к зернам реголита.

Отметим, что, несмотря на низкую влажность, сцепление в воздушно-сухой стеклокрупке в среднем составляет 0,28 Н/см² в рыхлом и 0,45 Н/см² в плотном состояниях, т. е. имеет тот же порядок величины, что и в реголите. Сцепление максимально у наиболее мелкой фракции и ослабевает вместе с увеличением крупности зерен. Угол внутреннего трения в рыхлом состоянии в среднем равен 31°, а в плотном — 37°. Связь его с крупностью зерен выражена нечетко.

Переходя к стеклосферам, укажем, что сцепление у них как в рыхлом, так и в плотном состоянии почти втрое меньше, чем у стеклокрупки, и мало зависит от крупности фракций. Угол внутреннего трения почти в 1,5 раза меньше, чем у стеклокрупки, и практически не зависит от крупности.

Смесь 35% стеклокрупки и 65% стеклосфер по сцеплению и углу внутреннего трения стоит ближе к стеклосферам.

Данные табл. 8.4 показывают, что, располагая набором входящих в нее материалов в воздушно-сухом состоянии и меняя их плотность и соотношение компонентов, можно до-

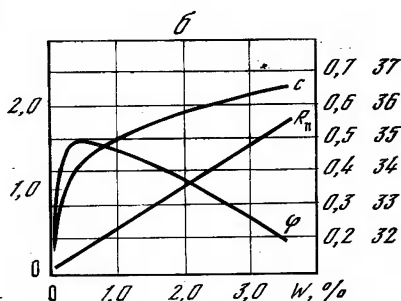
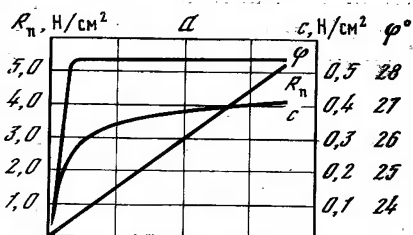


Рис. 8.7. Зависимость между влажностью W смеси 65% стеклосфер крупностью 100—125 мкм и 35% стеклокрупки 15—40 мкм и удельным сопротивлением пенетрации R_n , сцеплением c , углом внутреннего трения φ для рыхлого (а) и уплотненного (б) состояний смеси

биться значений c и ϕ , характерных для поверхностного слоя реголита в лунных условиях.

Есть все основания считать, что при сильном уплотнении сцепление реголита должно значительно увеличиваться за счет роста числа контактов и их суммарной площади, что не наблюдается при уплотнении воздушно-сухих материалов в земных условиях (при переходе от рыхлого к плотному состоянию сцепление увеличивается всего в 1,5—2,5 раза).

Для того чтобы промоделировать высокое сцепление плотного реголита, надо увеличить влажность аналога. Соответствующие опыты проделаны со смесью, содержащей 65% стеклосфер и 35% стеклокрупки в рыхлом и плотном состояниях. Результаты этих опытов представлены на рис. 8.7.

Как видно, увеличение влажности смеси от воздушно-сухого состояния до оптимально влажного ведет к линейному росту удельного сопротивления пенетрации как в рыхлом, так и в плотном материале. Нелинейная зависимость наблюдается в увеличении сцепления при росте влажности, но в обоих состояниях сцепление растет очень быстро в интервале от воздушно-сухого состояния до полного насыщения, затем рост его замедляется и при оптимальной влажности оно достигает максимума. Следует заметить, что по абсолютной величине максимальное сцепление $c_{\max} = 0,4 \div 0,6 \text{ Н/см}^2$ достаточно велико и может соответствовать сцеплению плотного реголита.

Угол внутреннего трения быстро увеличивается при увлажнении до максимальной гигроскопичности, а затем у рыхлого материала остается постоянным, а у плотного снижается. Абсолютные значения $\phi_{\max} = 35 \div 39^\circ$ также сопоставимы с данными для плотного реголита.

Таким образом, применяя стеклокрупку, стеклосферы и их смеси, соответствующие по гранулометрии составу реголита, и обеспечивая влажность в пределах от воздушно-сухого до оптимально влажного состояния, вполне возможно получить сцепление и угол внутреннего трения грунта-аналога, близкие к тем же характеристикам реголита. Совершенно не обязательно использовать крупку и сферы из свинцового стекла. Те же явления наблюдаются в любом гидрофильном порошке, и в частности в молотом базальте, чаще всего используемом как аналог реголита.

8.4. Несущая способность и деформации сыпучих грунтов в зависимости от их плотности

Несущая способность в соответствии с теорией предельного равновесия сыпучих грунтов прямо пропорциональна объемному весу, а последний равен произведению плотности на ускорение силы тяжести. На Земле плотность ρ в граммах массы на куби-

ческий сантиметр и объемный вес γ_0 в граммах силы на кубический сантиметр численно совпадают.

У сыпучих грунтов с зернами, не имеющими внутренних пор, вполне допустимо рассматривать объемный вес как показатель плотности. Но у грунтов с пористыми зернами только межзерновая пористость является показателем плотности упаковки. Объемный вес межзерновую пористость однозначно характеризовать не может, так как он зависит не только от нее, но и от пористости зерен.

Используя материалы с пористыми зернами, можно определить отдельно влияние плотности упаковки зерен и влияние объемного веса и выяснить, какой из этих факторов оказывает большее влияние на несущую способность и деформации грунтов при наиболее интересном для практики виде нагружения — вдавливании штампа. Такие эксперименты проведены Н. М. Зобачевым, В. В. Михеевым, В. П. Петрухиным и И. И. Черкасовым и подробно описаны в работах [107, 108].

Исследованы три пористых материала — аглопоритовая дресва, крупная и мелкая, и перлитовая дресва, а также один материал с плотными зернами — кварцевый песок средней крупности. Все они испытывались в воздушно-сухом состоянии, а кварцевый песок также и в маловлажном ($W=3,1\%$), которое позволяло придавать ему рыхлое состояние.

Материалы загружались в цилиндрический бак диаметром 60 см и глубиной 55 см и подвергались нагружению жестким круглым штампом диаметром 11,3 см с помощью гидродомкрата. Перед опытами материалы либо укладывали в рыхлом состоянии, либо их уплотняли вибрированием или трамбованием. Нагрузку прилагали ступенями в $2,5 \text{ Н/см}^2$ у рыхлых и 5 Н/см^2 у плотных материалов. Штамп погружался на глубину 5—7 см и затем подвергался разгрузке теми же ступенями до нуля. В ходе опытов получены кривые вдавливания, используемые для вычисления механических параметров грунта.

При рыхлом состоянии у всех материалов деформация происходит за счет уплотнения нижележащих слоев, без выпирания материала в стороны. У вибрированных и трамбованных наблюдается выпирание в стороны с образованием кольцевого тела выпирания, разделенного радиальными трещинами. Конечная критическая нагрузка в классическом понимании, т. е. нагрузка, вызывающая выпирание грунта из-под штампа, была отмечена только у плотных материалов. У рыхлых ее установить невозможно. Опыты лишний раз подтвердили концепцию К. Терцаги о развитии «общего» или «местного» сдвига в грунтах.

Результаты опытов с маловлажным кварцевым песком показали, что в рыхлом состоянии при $\epsilon=0,73$ его несущая способность $R=0$, а сжимаемость, характеризуемая коэффициентом постели $K=1,4 \text{ Н/см}^3$, чрезвычайно велика. Уплотнение вибрированием до среднетрещинного состояния при $\epsilon=0,57$ приводит к

тому, что обозначаются призмы выпирания на поверхности и появляется несущая способность $R=6,25 \text{ Н/см}^2$, а коэффициент постели увеличивается в 8 раз. Дальнейшее повышение плотности трамбованием переводит песок в плотное состояние при $\epsilon=0,54$. Коэффициент постели возрастает при этом еще в 9 раз, а несущая способность — в 6 раз и достигает $R=36 \text{ Н/см}^2$, и все это происходит при увеличении объемного веса от $0,0174$ до $0,0181 \text{ Н/см}^3$, т. е. только на 6%! (рис. 8.8).

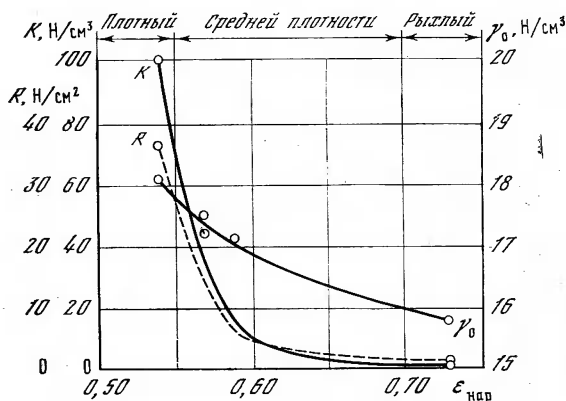


Рис. 8.8. Зависимость коэффициента постели K , сопротивления пенетрации R и объемного веса $\gamma_0 \cdot 10^3$ от коэффициента наружной пористости $\epsilon_{нар}$

Аналогичные опыты проводились с другими материалами в воздушно-сухом состоянии. Их результаты приводятся ниже (табл. 8.5). Из таблицы видно, что, несмотря на очень большую разницу объемных весов γ_0 рыхлых материалов (от $0,0032$ до $0,0159 \text{ Н/см}^3$), коэффициент межзерновой пористости $\epsilon_{нар}$ у них различается незначительно и коэффициент постели K имеет один и тот же порядок величины (от $1,6$ до $2,7 \text{ Н/см}^3$).

Утрамбованные материалы имеют совсем другие свойства. Коэффициент пористости в результате сильного уплотнения стал почти одинаковым ($0,48-0,50$), а коэффициент постели увеличился в среднем до 25 Н/см^3 , т. е. в 10 раз по сравнению с рыхлыми материалами. И это произошло при увеличении объемного веса в среднем всего на 16%.

Опыты показали, что главным фактором, определяющим механические свойства сыпучих материалов, является плотность упаковки зерен, выражаемая коэффициентом межзерновой пористости $\epsilon_{нар}$, а не объемным весом γ_0 (табл. 8.6).

Несущая способность зернистых грунтов может быть сильно увеличена, а сжимаемость снижена уплотнением и трамбованием при относительно небольших изменениях объемного веса. Легкий материал с пористыми зёрнами может иметь более высокую несущую способность, чем тяжелый, зёрна которого упакованы менее плотно.

Таблица 8.5

**Коэффициент межзерновой пористости и коэффициент постели
воздушно-сухих грунтов в рыхлом и утрамбованном состояниях**

Материал	Коэффициент межзерновой пористости ε	Объемный вес $\gamma_0 \cdot 10^3$, Н/см ³	Коэффициент постели K , Н/см ³
Состояние грунта рыхлое			
Дресва перлитовая	0,78	3,2	1,3
Дресва аглопоритовая			
мелкая	0,79	10,5	3,7
крупная	0,86	8,6	1,8
Песок кварцевый средней крупности	0,67	15,9	2,7
Состояние грунта утрамбованное			
Дресва перлитовая	0,50	3,8	11
Дресва аглопоритовая			
мелкая	0,50	12,5	20
крупная	0,48	10,8	50
Песок кварцевый средней крупности	0,55	17,1	22

Таблица 8.6

Коэффициент пористости рыхлого и плотного материалов

Материал	ε_p	$\varepsilon_{пл}$
Песок кварцевый оптимального состава	0,70	0,55
Песок кварцевый однородный	1,20	0,70
Смесь кварцевого и вспученного перлитового песка	10,20	1,34

И. И. Черкасов и К. Ибрагимов провели исследование зависимости форм деформации зернистых материалов при глубоком вдавливании штампа от исходной плотности упаковки [94, 98]. Изучался однородный кварцевый песок, кварцевый песок с гранулометрией, близкой к оптимальной, и смесь кварцевого и вспученного перлитового песка. Такой подбор материалов обеспечивал проведение опытов при особо рыхлом, рыхлом и плотном состояниях материалов.

Опыты проводились в специально сконструированном лабораторном лотке площадью 10×20 см и глубиной 20 см, в который с помощью особого устройства можно было заложить сыпучий материал светлого цвета с ортогональной системой темных прослоек того же материала. Нагружение производи-

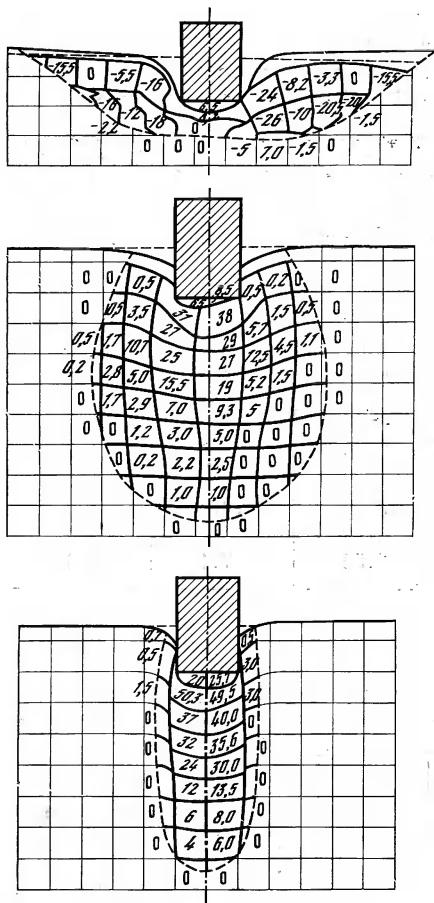


Рис. 8.9. Картограммы деформаций песка в испытательном лотке при вдавливании штампа в грунт плотный (вверху), рыхлый (посередине) и особо рыхлый (внизу)

его стороны. Наблюдается только уплотнение грунта. Участков разрыхления в деформированном объеме нет.

В плотном песке глубина распространения остаточных деформаций не превышает одной ширины штампа, но ширина деформированной зоны доходит до 3 ширины штампа по обе стороны от него. В грунте образуются поверхности скольжения по схеме Терцаги для общего сдвига. В пределах остаточно-деформированного объема грунт разрыхляется, кроме небольшой призмы под подошвой, где формируется уплотненное ядро. Поверхность песка за пределами штампа приподнимается.

лось штампом размерами 3×10 см, расположенным поперек лотка, на прессе, со снятием диаграмм вдавливания. До и после опыта фотографировалась система ортогональных прослоек в срединной плоскости лотка, что позволяло определить остаточные деформации грунта под штампом без искажающего влияния стенок.

Результаты нескольких опытов представлены на рис. 8.9. На картограммах нанесены искаженные в ходе опыта сетки, соответствующие ортогональным ранее прослойкам; цифрами показаны изменения плотности грунта в процентах (уплотнение «+», разрыхление «—») в пределах каждой ячейки сетки.

Оказалось, что в особо рыхлой смеси перлитового и кварцевого песка образуется узкая уплотненная зона глубиной от 3 до 3,5 ширины штампа. Поверхность смеси даже непосредственно рядом со штампом не деформируется. Уплотненная зона почти не распространяется в стороны.

В рыхлом песке уплотненная зона значительно шире, а глубина ее составляет около 3 ширины штампа. Поверхность слегка оседает на расстоянии в одну ширину штампа с каждой

Таким образом, опыты убедительно продемонстрировали, что зернистые рыхлые материалы отличаются локальным развитием деформаций, их деформации сводятся к уплотнению, а сдвига и выпирания в стороны из-под штампа нет. В плотном материале, наоборот, почти нет уплотнения, а деформации сводятся к сдвигу по поверхностям скольжения с разрыхлением внутри выпираемого объема.

Эти свойства имеют очень важное значение для взаимодействия грунтов с колесами транспортных средств. Между тем их исследованию еще не было уделено должного внимания. Главная причина состоит, конечно, в том, что движения по рыхлым грунтам стараются всемерно избегать. Но на Луне этого сделать нельзя и надо ориентироваться на то, что посадочные устройства и колеса луноходов будут вызывать глубокие местные деформации рыхлых слоев реголита.

8.5. Влияние силы тяжести на механические свойства сыпучих и связных грунтов

Экспериментальное исследование влияния силы тяжести на механические свойства сыпучих и связных грунтов проводилось двумя путями [108]. Первая серия опытов была осуществлена на самолете, летевшем по специальной траектории, на расчетном участке которой грунт находился под действием ускорения $a=1,62 \text{ м/с}^2$, т. е. в 6 раз меньшего, чем ускорение силы тяжести на поверхности Земли. Вторая серия опытов проводилась по методу, разработанному Г. И. Покровским [119] на центробежной машине, в которой грунт испытывал ускорения, равные 55,1; 98,1 и $196,3 \text{ м/с}^2$, т. е. в 5,6; 10,0 и 20,0 раз большие земного.

В обеих сериях проводились контрольные опыты при неподвижном состоянии самолета и центрифуги, т. е. при земном ускорении силы тяжести $g=9,81 \text{ м/с}^2$. Коэффициент перегрузки, равный a/g , изменялся, таким образом, в диапазоне от 0,167 до 20,0.

Исследованы три грунта, свойства которых представлены в табл. 8.7.

Общий вид стенда с приборами для испытания грунтов на самолете показан на рис. 8.10. Для определения угла естественного откоса сыпучих грунтов использовались кубические ящики с прозрачными стенками, заполненные на $1/3$ объема грунтом. В исходном положении они установлены на ребро так, что поверхность грунта горизонтальна, а грани ящиков наклонены под углом 45° . В полете, когда устанавливается $a=1,62 \text{ см/с}^2$, ящики одновременно поворачиваются на 45° , сыпучий материал приходит в движение и занимает новое положение, определяе-

Таблица 8.7

Основные свойства исследованных грунтов

Грунт	Коэффициент пористости грунта e		Угол внутреннего трения плотного грунта φ , град	Сцепление плотного грунта c , Н/см ²
	рыхлого	плотного		
Песок кварцевый воздушно-сухой				
на самолете	0,76	0,62	29	0
на центрифуге		0,57	35	0,2
Дресва аглопоритовая воздушно-сухая				
на самолете и на центрифуге	0,80	0,71	32	0
Глина мягкопластичная				
на самолете и на центрифуге		0,80	10	2,8

мое его углом естественного откоса. Процесс фиксировался кино съемкой.

Анализ результатов показал, что наблюдается небольшое уменьшение угла естественного откоса по сравнению с тем, который устанавливается на Земле. По-видимому, оно связано с влиянием вибраций летящего самолета и не связано с изменением ускорения силы тяжести.

Для опытов с вдавливанием штампа были использованы баки диаметром 60 и 40 см с засыпкой на глубину 30—40 см. Опыты проводились с кварцевым песком и аглопоритовой дресвой в рыхлом и плотном состояниях и с мягкопластичной глиной. Нагружение производилось круглыми жесткими штампами диаметрами 10 см в большом баке и 5 см в малом с помощью электродомкратов. Усилие домкрата и перемещение штампа регистрировались на осциллограмме.

В результате опытов установлено, что уменьшение силы тяжести в 6 раз приводит к снижению несущей способности плотного кварцевого песка в 3,4 раза и плотной аглопоритовой дресвы в 1,8 раза. У рыхлых материалов, как и в других подобных опытах, несущую способность, соответствующую выпиранию грунта из-под штампа, зафиксировать не удалось. Поэтому производилось сравнение глубины вдавливания штампа при 9,81 и 1,62 м/с² при одинаковом среднем давлении в подошве $\sigma = 5$ Н/см². Опыты показали, что осадка штампа в песке увеличивается в 3,3 раза, а в аглопоритовой дресве — в 4,5 раза.

Таким образом, у сыпучих материалов снижение ускорения силы тяжести дало совершенно очевидный эффект, выражающийся в увеличении глубины вдавливания и снижении несущей способности, хотя последнее и не было равно шестикратному,

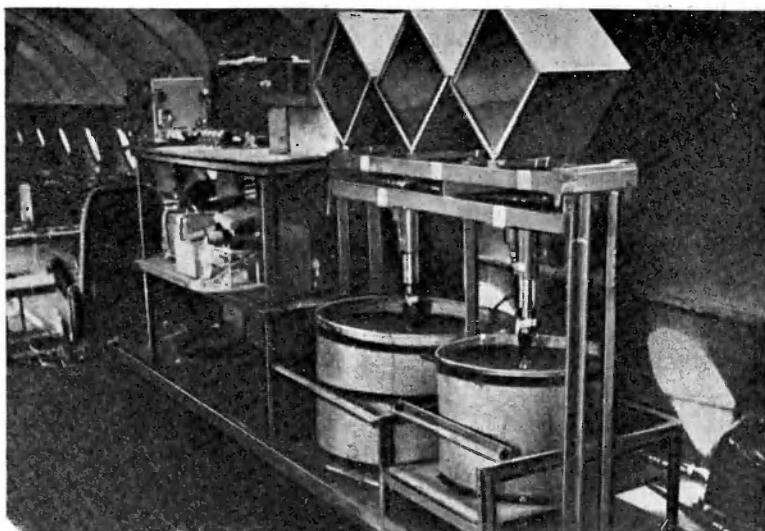


Рис. 8.10. Комплект испытательных приборов на борту самолета

которое теоретически должно иметь место в идеально сыпучих грунтах.

Совершенно другие результаты дали опыты с мягкопластичной глиной. У штампа диаметром 10 см вплоть до давления под штампом в 25 Н/см^2 уменьшение тяжести не влияет на глубину вдавливания, а при давлении 30 Н/см^2 уменьшение тяготения в 6 раз приводит к увеличению глубины вдавливания всего на 19%. Этого и следовало ожидать ввиду большого истинного сцепления глины, которое сохраняется в любых условиях опыта, и ее низкого внутреннего трения.

На самолете проводились опыты с вдавливанием конических инденторов. Ящики с ребрами в 15 см были заполнены кварцевым песком и аглопоритовой дрсевой в рыхлом состоянии. На крышках ящиков были смонтированы пружинные механизмы для вдавливания инденторов и самописцы, фиксирующие глубину вдавливания. Каждый индентор представлял собой конус с диаметром основания 3,4 см и высотой 2 см, навинченный на тонкий стержень, который удерживался в направляющей трубке пружинного механизма с помощью чеки. Начальное усилие в опытах с песком было равно 40 Н, а в опытах с дрсевой — 44 Н. При максимальной глубине погружения остаточные усилия соответственно составляли 23 и 22 Н и прекращение вдавливания происходило в силу сопротивления грунта, а не окончания завода пружин. Опыты проводились сначала на Земле, а затем в полете при $a = 1,62 \text{ см/с}^2$ путем выдергивания чеки. Они пока-

зали, что за счет снижения силы тяжести в 6 раз глубина вдавливания в песке увеличилась на 82%, а в аглопоритовой древе — на 105%. Эти результаты учтены при расшифровке показаний грунтомера-пенетрометра «Луны-13».

Большая центробежная машина имеет вертикальную ось вращения, на которой закреплено горизонтальное коромысло. По концам коромысла подвешены каретки с исследуемым грун-

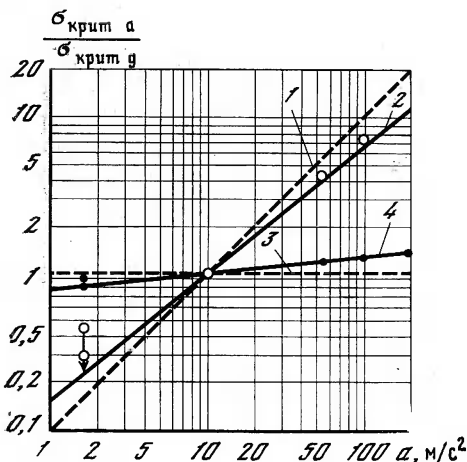


Рис. 8.11. Зависимость несущей способности сыпучего и связного грунтов от ускорения силы тяжести

том и механизмы для его нагружения. Радиус вращения кареток 2,5 м. Число оборотов машины может изменяться от 23 до 250 об/мин, чему соответствуют ускорения центробежных сил в каретках от 1,47 до 173,4 м/с. При вращении машины каретки отклоняются по направлению равнодействующей силы и силы тяжести. На каждую частицу грунта, помещенного в каретку, действует результирующее ускорение, заданное программой опыта.

Нагружение поверхности грунта производилось полосовым штампом размерами 2×10 см, осадка которого измерялась с помощью сельсинов. В результате каждого опыта получали кривую вдавливания штампа, по которой затем определяли несущую способность.

Опыты проводились при следующих отношениях результирующего ускорения к ускорению силы тяжести на Земле: $a/g = 1,0; 5,6; 10,0$ и $20,0$.

Грунты при укладке в каретки машины уплотнялись трамбованием, а не вибратором, благодаря чему их плотность была несколько больше, чем в опытах на самолете.

На рис. 8.11 в логарифмических координатах представлены зависимости отношения несущей способности грунта $\sigma_{крит а}$ при ускорении a , действующем во время опыта, к несущей способ-

Т а б л и ц а 8.8
Влияние силы тяжести на несущую способность грунтов

Грунт	$\sigma_{\text{крит}} a_1 / \sigma_{\text{крит}} g$	$\sigma_{\text{крит}} a_2 / \sigma_{\text{крит}} g$
Песок кварцевый	0,22	4,40
Глина мягкопластичная	0,79	1,13

П р и м е ч а н и е. Значения $\sigma_{\text{крит}}$ для $a_1 = 1,62 \text{ м/с}^2$ получены экстраполяцией прямых на рис. 8.11; $a_2 = 55,1 \text{ м/с}^2$.

ности $\sigma_{\text{крит}} g$ при земном ускорении силы тяжести g , от величины действующего ускорения a . Для песка изменение несущей способности (прямая 2) очень велико, для глины (прямая 4) существенно меньше. На том же графике нанесены экспериментальные точки, полученные при $a = 1,62 \text{ м/с}^2$ в опытах на самолете. Они близки к прямым, построенным по опытам на центрифуге.

Практический интерес представляет изменение несущей способности грунтов при изменении силы тяжести в 6 раз. Такие данные для штампа размерами $2 \times 10 \text{ см}$ приводятся в табл. 8.8.

Анализ этих данных с позиций теории предельного равновесия показал, что по экспериментальным данным несущая способность песка изменяется несколько меньше, чем должно быть у идеального сыпучего материала, а у глины больше, чем можно было ожидать, хотя и незначительно. Причины этого могут крыться в несоответствии действительной зависимости между вертикальным сжимающим напряжением и предельным сопротивлением песка сдвигу той, которая следует из уравнения Кулона, и влиянии внутреннего трения в глине, которое проявляется тем сильнее, чем меньше размер штампа.

8.6. Влияние адсорбированных паров и газов на механические свойства сыпучих грунтов

Поверхностный слой реголита подвергается на Луне постоянному влиянию глубокого вакуума порядка $10^{-14} \text{ мм рт. ст.}$, а его температура меняется периодически в пределах 300°С . Эти условия, действующие на протяжении миллиарда лет, приводят поверхность частиц реголита в особое, весьма чистое состояние, отражающееся на взаимодействии зерен в контактах, которое в свою очередь влияет на механические свойства. В самом начале работ по изучению Луны с помощью космических аппаратов делались попытки воспроизвести в лабораториях эти усло-

вия и оценить их влияние на свойства различных минеральных порошков.

Имеются данные о том, что минеральные порошки, насыпанные в вакууме на пластинки из камня, стекла и меди, способны удерживаться на перевернутой пластинке силами сцепления слоем до 2 мм. Тонкий кварцевый порошок с удельной поверхностью 200 м²/г образовывал в вакууме нитевидные структуры, прочно прилипавшие к стеклянным стенкам [120].

Был проведен ряд опытов с минеральными порошками, приготовленными из различных горных пород [121]. Камень сначала обкалывался со всех сторон, чтобы обнажить чистые грани, и затем размалывался в атмосфере аргона на мельнице с шарами, сделанными из карбида вольфрама. После этого порошок выдерживался в аргоне до переноса в вакуум-камеру. В предварительных опытах 80% зерен имели крупность 3 мкм, 90% — менее 17 мкм и 99% — менее 70 мкм. В основных опытах зерна имели крупность от 100 до 140 мкм.

Вакуум-система позволяла понизить давление в камере до 10^{-10} мм рт. ст. в течение 12 ч. Внутри камеры был смонтирован механизм, который резко встряхивал шлифованную пластинку с заранее насыпанным на ней слоем испытуемого порошка. В процессе откачки порошок нагревали инфракрасными лучами через окно камеры и после прекращения выделения адсорбированных газов пластинку встряхивали с возрастающей силой, пока все зерна не удалялись с нее.

Ускорение пластинки определялось с точностью до 0,5 g. Опыты велись с оливиновым и обсидиановым порошками при давлении от $6,3 \cdot 10^{-10}$ до $1,3 \cdot 10^{-9}$ мм рт. ст. после нагрева до 100° в течение 24 ч. Для полного очищения пластинки потребовалось довести ускорение встряхивания до 12 g. Напряжение отрыва по площади контакта частицы с поверхностью пластинки из того же материала оказалось близким к 9 Н/см². В другой серии опытов такое напряжение составляло 1,6 кН/см².

При свободном насыпании в вакуум мелких пылеватых частиц удалось наблюдать, как они слипаются в хлопья и образуют пористые возвышения с последующим возникновением ответвлений и мостов и как создается ажурная дендритная структура. В земных условиях эти явления наблюдались при крупности зерен около 15 мкм. На Луне, где сила тяжести меньше, крупность частиц может возрасти до 50 мкм. Правда, такие явления имели место при скоростях падения всего в 10 см/с, в то время как на Луне скорости могут приближаться к космическим.

При повышении температуры в контактах между зернами конденсационных структур, возникших в вакууме, создаются условия перекристаллизации и сращивания решеток соприкасающихся частиц. Для этого силикатные породы надо нагреть до температуры, равной 0,8—0,9 от температуры плавления

Таблица 8.9
Коэффициент трения при разных условиях эксперимента

Материал	Давление атмосферное, температура комнатная	Вакуум 10^{-5} — 10^{-6} мм рт. ст., температура	
		комнатная	190—250° С
Стеклянные шары	0,12	0,36	0,49
Кварцевые пластинки	0,33	0,60	0,60

Таблица 8.10
Характеристики адсорбированных пленок на зернах воздушно-сухих тонкомолотых минеральных порошков

Материал порошка	Удельная поверхность, м ² /г	Количество адсорбата		Толщина пленки адсорбата, А
		мг/г	мг/м ²	
Кварц	0,126	0,187	1,48	12,5
Альбит	0,090	0,326	3,62	32,5
Диопсид	0,085	1,660	19,50	172
Оливин	0,145	5,040	34,50	305

(для кварца, например, до 1300°С), что может произойти при соударении частиц с высокими скоростями. Происходит как бы сварка в контактах и образование кристаллизационной структуры. Однако площадь каждого контакта мала и у частиц крупностью 5 мкм не превышает $2,3 \cdot 10^{-13}$ см². На ней может уместиться всего около 50 атомов. Поэтому, несмотря на высокую прочность контакта, суммарная предельная нагрузка на него получается очень небольшой. Так как число контактов в рыхлых структурах также невелико, то и общая прочность структуры должна быть малой.

В работе [122] описаны опыты по выявлению влияния вакуума на трение между стеклянными шариками и между кварцевыми пластинками. Опыты проводились сначала при атмосферном давлении, а затем при вакууме порядка 10^{-5} — 10^{-6} мм рт. ст. Пористость системы шариков была 37%. Среднее по сечению образца нормальное давление на шары изменялось от 16,5 до 22 Н/см². Результаты опытов представлены в табл. 8.9.

Приводятся также данные [121, 122] об увеличении сопротивления пенетрации тонкомолотой пемзы после ее предварительного нагрева до 300°С в вакууме 10^{-6} — 10^{-8} мм рт. ст. Сопротивление статической и динамической пенетрации повышалось также у кварцевой муки после предварительного нагрева до 100°С в вакууме 10^{-5} — 10^{-7} мм рт. ст.

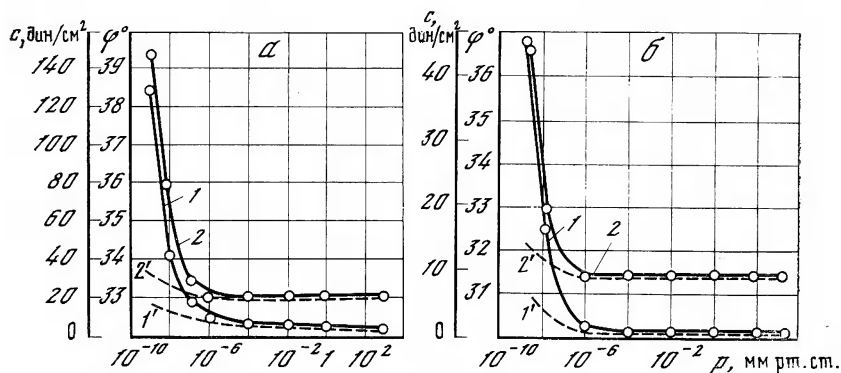


Рис. 8.12. Зависимость сцепления c (1, 1') и угла внутреннего трения φ (2, 2') от величины вакуума при предварительном прогреве (сплошные линии) и без него (штриховые)

a — кварц; b — альбит

В результате этих и аналогичных им экспериментов сделан вывод о том, что на Луне должно существовать слабое сцепление между зернами минеральных грунтов, обусловленное молекулярными силами. Это сцепление может способствовать возникновению очень рыхлых ажурных структур, ответственных за необычные оптические и тепловые свойства лунной поверхности.

В процессе исследования механических свойств реголита по данным «Луны-16» В. В. Шандор провел весьма интересные эксперименты по изучению процессов десорбции паров и газов с поверхности минеральных частиц в тонкомолотых порошках, состоящих из чистых минералов кислого состава (кварц и альбит) и основного (диопсид и оливин). Крупность зерен лежала в пределах 10—40 мкм. Опыты проводились в вакуум-камере, описанной в главе 6 (см. рис. 6.10, 6.11). Порошки минералов закладывались в барабан камеры в воздушно-сухом состоянии, которое устанавливалось самопроизвольно при хранении порошков в комнатных условиях. В процессе опыта они подвергались воздействию вакуума при температуре 20°C или ступенчатому нагреву до 450°C в вакууме. При этом производилось исследование десорбируемых газов и определение параметров сопротивления сдвигу в зависимости от вакуума и температуры [89].

Из табл. 8.10 видно, что при воздушно-сухом состоянии толщина адсорбированной пленки влаги составляет от 5 до 120 слоев молекул и у основных пород толщина пленки на порядок больше, чем у кислых. Следовательно, в нормальной земной атмосфере прямой контакт чистых минеральных поверхностей базальтовых зерен совершенно исключен.

В присутствии минеральных порошков создать вакуум ниже 10^{-9} мм рт. ст. не удалось. При этом вакууме и комнатной тем-

пературе удалось десорбировать очень незначительное количество паров и газов. Но после повышения температуры до 450° десорбция резко увеличилась, особенно у основных пород (рис. 8.12). Результатом этого явилась очистка поверхности и возрастание сцепления и трения, уже отмеченные в опытах с реголитом (см. главу 6). По абсолютной величине среднее по сечению сцепление увеличивается примерно в 5 раз, а угол внутреннего трения — на 6° . Дальнейшее повышение температуры и углубление вакуума, судя по характеру кривых на рис. 8.12, могло бы привести к еще более значительному увеличению параметров сопротивления сдвигу.

Опыты В. В. Шандора представляют принципиальный интерес для механики сыпучих тел. До сих пор принимали, что в воздушно-сухом состоянии такие тела сцеплением или не обладают, или оно ничтожно мало. Считается, что сцепление в пылеватых грунтах появляется за счет водных пленок, а затем менисков влаги и достигает максимума при некоторой оптимальной влажности. Дальнейшее увеличение влажности приводит к уменьшению капиллярной связности, и при полном насыщении сцепление исчезает. В. В. Шандор показал на опытах, что всему этому предшествует в глубоком вакууме прочное молекулярное сцепление сухих зерен в контактах, которое быстро уменьшается при образовании тончайших слоев влаги на их поверхности и падает почти до нуля, когда толщина слоя адсорбированной влаги составляет несколько молекул.

ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕЛИОРАЦИИ
ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Практический опыт показал, что движение по поверхности Луны людей и легких транспортных средств вполне возможно и реголит в естественном залегании обладает достаточной несущей способностью. В то же время обнаружена его большая неоднородность по трассам движения, способность к пылеобразованию, неустойчивость склонов и ряд других отрицательных свойств.

Необходимость в технической мелиорации реголита и его использовании для производства строительных материалов и изделий на Луне может появиться после того, как полеты на Луну станут регулярными и начнется освоение ее поверхности, в первую очередь для создания научных станций и баз, а затем и для организации различных производств, требующих пониженной гравитации и глубокого вакуума. Тем не менее проблема технической мелиорации лунных грунтов уже давно обсуждается на страницах журналов и книг, посвященных Луне (см., например, [123, 124]).

Речь идет в основном об упрочнении реголита, потому что скальные породы, выходящие на поверхность и лежащие в глубине, обладают большой прочностью и не нуждаются в укреплении. Полный обзор современных методов технической мелиорации дисперсных грунтов дан в книге Л. В. Гончаровой [125]. С учетом лунных условий из многочисленных способов технической мелиорации могут быть использованы следующие.

1. Укрепление глубинных слоев инъекциями жидких реагентов, которые могли бы достаточно быстро отвердеть в массе грунта вопреки лунному вакууму.

2. Термическое укрепление путем спекания реголита с добавкой легкоплавких компонентов или без нее.

3. Уплотнение реголита с улучшением его гранулометрического состава крупнозернистыми добавками или без него.

Доставка реагентов для укрепления грунтов с Земли должна обходиться чрезвычайно дорого, но тем не менее в литературе обсуждались возможности такого решения проблемы. Так, например, в работе [123] были перечислены следующие реагенты, которые, по мнению ее авторов, могут быть использованы на

Луне: эпоксидные смолы, лигносульфонат, акрилат кальция, фурфуроланилин с добавкой полифункциональных аминов, жидкое стекло и даже цемент. Однако там же отмечены трудности, возникающие при использовании воды и органических жидкостей, которые в лунных условиях должны бурно испаряться. Реально осуществимым считается укрепление грунта инъекциями на некоторой глубине от поверхности, где нет больших колебаний температуры и возможность испарения реагентов до их отверждения существенно уменьшается. После того как такой укрепленный слой в глубине будет создан, лежащий выше пылевидный грунт должен быть убран.

Винтеркорн и Джонсон [123] провели опыт по укреплению тонкомолотого кварца в вакууме жидким стеклом с хлористым кальцием и вначале получили хороший эффект. Но затем вследствие испарения влаги в вакууме полученный гель кремнекислоты испытал деструкцию и рассыпался в порошок.

Те же авторы провели эксперименты по укреплению тонкомолотого кварца в вакууме фурфуроланилиновой смолой. При этом выяснилось, что вакуум порядка 170 мм рт. ст. способствует быстрому капиллярному распространению пленок фурфуrolа и анилина в грунте, но уже при 2 мм рт. ст. оно прекращается вследствие испарения жидкостей. Опыты с укреплением того же материала в вакууме путем пропитки образца под гидравлическим давлением были успешными и показали, что в течение двух недель образцы равномерно отвердели.

Выбор фурфуроланилиновой смолы не был случайным, ибо она отличается наиболее низким расходом реагентов. Для закрепления 1 м³ пылевато-песчаного грунта требуется около 20 кг смеси фурфуrolа и анилина. Однако для укрепления грунта слоем в 20 см на площади всего лишь в 1 га расход реагентов составляет уже 40 т.

Ясно, что реагенты для укрепления лунных грунтов следует искать на Луне. К их числу в первую очередь относятся легкоплавкие породы и минералы, которые могли бы использоваться при термическом методе укрепления. Так называемый метод спекания с жидкой фазой [126, 128] состоит в том, что заранее заготовленная смесь сыпучего материала и измельченной легкоплавкой добавки нагревается до температуры выше температуры плавления добавки, при необходимости прессуется, а затем остывает. Кристаллизуясь в порах материала, добавка связывает его в прочную камневидную массу. Эта масса может быть использована для изготовления различных строительных камней и изделий. Не исключается и возможность укрепления хорошо проницаемого грунта инъекцией расплава добавки под давлением.

Известно, что к числу широко распространенных во Вселенной элементов относится сера. Особенно велика возможность добычи серы в вулканических районах. На Земле громадные

Таблица 9.1

Результаты испытаний образцов из термически укрепленного молотого базальта с добавками серы и азотнокислого натрия

Размеры и состав образцов	Средние пределы прочности образцов, Н/см ²			
	на сжатие		на растяжение	
	при 20° С	после 20 циклов замораживания и оттаивания	при 20° С	после 20 циклов замораживания и оттаивания
Малые образцы; 88,2% песка, 11,8% серы	750	620	200	160
Малые образцы; 87% песка, 13% NaNO ₃	1410	1340	210	180
Большие образцы; 60% дресвы, 33% песка, 7% NaNO ₃	1390	1260	150	110

количества серы высвобождаются при очистке нефти, причем она далеко не всегда находит дальнейшее применение и идет в отвал. В литературе [127] встречаются указания на возможность добычи на Луне серы и использования ее в строительстве.

Для уточнения свойств грунтов, термически укрепленных с добавкой серы, И. И. Черкасовым и Н. Ф. Козловой в МИИТе были проведены в 1976 г. специальные эксперименты [128]. В качестве объекта укрепления использовался молотый базальт песчано-пылеватого состава, а в качестве добавки самородная тонко измельченная сера в виде порошка с зернами не крупнее 0,1 мм.

Оптимальный состав смеси из 11,8% серы и 88,2% по весу базальтового порошка был установлен предварительными опытами. Влажность смеси до обжига составляла в среднем 0,41%. Смесь набивали в цилиндрические формы из стали, которые нагревали в муфельной электропечи при температуре 130—150° С в течение 2 ч. После нагрева смесь в горячем состоянии уплотняли в формах до оптимальной плотности, равной 1,91 г/см³.

Образцы диаметром 21,0 мм и высотой 20,5 мм испытывали после охлаждения на сжатие и растяжение. Испытания проводились при комнатной температуре 20° С, а также при температурах —60 и 100° С. Кроме того, часть образцов прошла 20 циклов замораживания и оттаивания при температурах —60, 20 и 100° С (см. табл. 9.1).

Испытания повторялись 10 раз. Изменчивость показателей прочности составила в среднем $\pm 25\%$.

При погружении в воду образцы не меняли своих свойств, при длительной выдержке в керосине они размягчались и крошились с потерей веса 5—8% за два месяца. В качестве легкоплавких добавок, кроме серы, могли быть использованы также

Таблица 9.2

Результаты испытания вулканического песка, термически укрепленного, с добавками минеральных солей

Компоненты добавок	Содержание компонентов, % по весу	Температура обработки, °С	Предел средней прочности при сжатии, Н/см ²
KNO ₃	40	270	1840
NaNO ₃	60		
KNO ₃	60	270	1930
NaNO ₃	40		
KNO ₃	50	270	2200
NaNO ₃	50		
KNO ₃	91	350	2760
KCl	9		
KNO ₃	98	350	2710
KCl	2		
KNO ₃	94	350	3120
KCl	6		

различные минеральные соли и их эвтектические смеси. Пока не известно, какие именно соли можно будет добывать на Луне, и приведенные ниже данные рассчитаны лишь на то, чтобы привлечь внимание читателей к новому и, возможно, эффективному в лунных условиях способу термического укрепления грунтов и производства строительных материалов и изделий, который был предложен и проверен в лабораторных условиях в 1972—1976 гг. [128].

В качестве легкоплавких солей в первых экспериментах по укреплению мелкозернистого вулканического песка использовались нитраты и галогениды щелочных металлов и их бинарные смеси¹. Смешение измельченных в порошок солей и воздушно-сухого грунта проводилось вручную до получения однородной смеси, а нагрев в муфельных электропечах — в цилиндрических формах. Дозы добавок в первых опытах соответствовали полному заполнению пор в грунте. Изготавливались большие образцы диаметром 35 мм, которые после остывания подвергались испытанию на сжатие (табл. 9.2).

Дальнейшие опыты² проводились с молотым базальтом Ка-стопольского карьера двух фракций в виде пылеватого песка или дресвы, в которой преобладали зерна крупностью 2—5 мм при наименьшей крупности 0,5 мм.

¹ Опыты проводили И. Б. Адамович, А. Н. Адамович, В. Ф. Демин, В. С. Сулимов во ВНИИГе.

² Опыты проводили В. И. Никитина, Н. Ф. Козлова и И. И. Черкасов в МИИТе.

В качестве добавки применялся азотнокислый натрий NaNO_3 . Предварительными опытами был установлен оптимальный состав смеси, состоящий из 13% NaNO_3 при 87% пылеватого песка по весу. Оптимальная плотность после горячего прессования в форме 1,91 г/см³. Влажность образцов перед обжигом была равна 0,41%. Изготавливались малые цилиндрические образцы диаметром 21,0 мм и высотой 20,5 мм.

Кроме того, изготавливались большие образцы диаметром и высотой 40 мм, содержащие 60% базальтовой дресвы, 33% базальтового пылеватого песка и 7% NaNO_3 по весу. Смесь песка с NaNO_3 заполняла пустоты в дресве.

Нагрев образцов обоих типов проводился в стальных формах в муфельной печи при температурах 340—360° С. Образцы выдерживались до равномерного прогрева (малые 2 ч, а большие 3 ч) при контроле температуры термопарой в центре тяжести образца. После обжига образцы прессовали в горячем виде в тех же формах, малые до плотности 1,91 г/см³, а большие до 2,28 г/см³. После охлаждения часть образцов испытывали на прессе при комнатной температуре, а часть при температурах —60 и 100° С. Кроме того, часть образцов прошла 20 циклов замораживания и оттаивания при температурах —60, 20 и 100° С. Ввиду гигроскопичности образцов они проходили все испытания в тонких резиновых оболочках. Испытания повторялись 10 раз. Прочность образцов изменялась в пределах $\pm 20\%$ (табл. 9.1).

При погружении в воду все образцы быстро разрушались вследствие растворения азотнокислого натрия. При погружении в керосин и выдержке в нем в течение 1 года в образцах не было обнаружено никаких видимых изменений.

Приведенные выше данные (см. табл. 9.1) показывают, что, используя легкоплавкие добавки в виде серы или азотнокислого натрия, можно получить при умеренном нагреве (до 150—360° С) прочный камневидный материал, приближающийся по механическим свойствам к кирпичу или бетону. Введение легкоплавких добавок в несколько раз снижает температуру термообработки против той, которая потребовалась бы для спекания чистого базальтового порошка и тем более для производства базальтового литья, поскольку температура плавления базальта около 1250° С.

Технологию термического укрепления реголита в лунных условиях еще предстоит разработать. То же относится и к добыче легкоплавких минералов или солей на Луне. Очевидно, что эти работы могут быть предприняты лишь на более поздних этапах освоения Луны, когда для них будут созданы необходимые предпосылки.

На первых этапах техническая мелиорация лунных грунтов может осуществляться, по-видимому, лишь в двух направлениях: простого уплотнения и уплотнения с предварительным улучшением гранулометрического состава.

Таблица 9.3

Механические свойства воздушно-сухих вулканических песков в рыхлом и плотном состояниях

Тип вулканического песка	Плотность минерального скелета, г/см ³	Модуль общей деформации, Н/см ²	Сцепление, Н/см ²	Угол внутреннего трения, град
Состояние песка рыхлое				
Андезито-базальтовый мелкий	1,3	360	0	24
Андезито-базальтовый пылеватый	0,85	170	0,7	20
Состояние песка плотное				
Андезито-базальтовый мелкий	1,81	2500	1,3	35
Андезито-базальтовый пылеватый	1,12	1000	1,4	27

Таблица 9.4

Механические свойства пылеватого песка из молотого базальта в рыхлом и плотном состояниях

Состояние песка	Плотность минерального скелета, г/см ³	Модуль общей деформации, Н/см ² , при давлении	
		0—5 Н/см ²	0—15 Н/см ²
Рыхлое	1,35	2,0	5,2
Плотное	1,87	150	140

Влияние уплотнения на сопротивление пенетрации у лунного реголита и его земных аналогов наглядно показано на рис. 6.23 (см. главу 6). Если принять, что коэффициент пористости реголита в природном залегании $\epsilon=1,0$, то удельное сопротивление пенетрации около 0,1 Н/см². При уплотнении до $\epsilon=0,8$ оно увеличивается вдвое, а при $\epsilon=0,6$ — в 4 раза.

Опыты, сделанные с вулканическими песками [129], показали, что они обладают склонностью к рыхлой укладке при свободном насыпании и вследствие этого в рыхлом состоянии отличаются весьма низкими значениями модуля общей деформации и параметрами сопротивления сдвигу. Однако уплотнение резко меняет их свойства, что видно из табл. 9.3.

Из таблицы видно, что мелкий песок хорошо уплотняется и значительно повышает свои механические свойства. У пылеватого песка способность к уплотнению ниже, меньше и эффект уплотнения.

В работе [129] приведены следующие данные по пылеватому базальтовому песку в воздушно-сухом состоянии при разной плотности (табл. 9.4).

Приведенные цифры убедительно свидетельствуют об эффективности уплотнения аналогов реголита для улучшения их механических свойств.

Поверхностное уплотнение на Земле проводят катками, виброкатками, вибраторами и трамбовками. Наиболее производительны при больших площадях уплотнения виброкатки. Однако процесс уплотнения на Луне будет происходить в особых условиях, которые могут его существенно изменить по сравнению с тем, что мы наблюдаем на Земле. Прежде всего низкая гравитация на Луне потребует загрузки катков очень большими объемами грунтового балласта. Но, с другой стороны, полное отсутствие влаги облегчит уплотнение слабосвязного реголита, а отсутствие воздуха в порах ускорит уплотнение и уменьшит пылеобразование. После уплотнения должно значительно возрасти сцепление между зернами за счет сил Ван-дер-Ваальса в контактах. Возможно, однако, что этот процесс начнет проявляться прежде, чем будет достигнута максимальная плотность. Во всяком случае, технология уплотнения потребует детальной разработки. Первые опыты в этом направлении могут быть проведены в больших вакуум-камерах, используемых для испытаний объектов космической техники. Неудовлетворительная уплотняемость пылеватых песков делает целесообразным предварительное улучшение их гранулометрического состава. На Земле для этого применяют добавки глинистых частиц. Последние, взаимодействуя с влагой, образуют связующее вещество, которое объединяет пылеватые и песчаные зерна в сплошную массу. При повышении влажности сцепление, порождаемое глиной, ослабевает, но прочность грунта продолжает обеспечиваться прямым контактом песчаных частиц. На Луне нет ни воды, ни глины и принципы создания смесей оптимального гранулометрического состава должны быть другими.

По-видимому, практическое решение состоит в подборе смеси из крупнопесчаных и гравелистых фракций с заполнением пустот между ними природным реголитом. Действуя таким образом, можно при уплотнении получить материал с очень низким коэффициентом пористости и использовать в наибольшей мере молекулярное сцепление в точках контакта минеральных частиц.

Крупные фракции, необходимые для улучшения состава реголита, можно получить на Луне двумя путями: отсевом их из реголита на виброситах или дроблением скальных пород. Смешение крупных фракций с природным реголитом может быть осуществлено в ротационных или вибромешалках. Подбор состава смеси должен проводиться опытным путем из условия достижения наибольшей плотности.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ГРУНТАХ МЕРКУРИЯ, ВЕНЕРЫ И МАРСА

Полеты автоматических межпланетных станций, запущенных в СССР и США в сторону Меркурия, Венеры и Марса с 1961 по 1976 г., принесли совершенно новые данные об атмосферах, рельефе и грунтах этих планет. В частности, неожиданностью, по мнению академика В. А. Амбарцумяна¹, явилось то, что поверхности планет оказались столь же пересеченными кратерами и горными цепями, как и поверхность Луны.

Американская станция «Маринер-10» в 1974—1975 гг. трижды пролетела вблизи Меркурия и превратилась в его искусственный спутник [1, 2, 14]. Меркурий часто называют братом Луны, на которую он поразительно похож своими малыми размерами, строением поверхности и практическим отсутствием атмосферной защиты от метеоритов и солнечного ветра.

Ускорение силы тяжести на поверхности Меркурия составляет 368 см/с^2 , или 38% от земного. Средняя плотность Меркурия $5,55 \text{ г/см}^3$ близка к земной и значительно больше лунной, что говорит о вероятности существования тяжелого металлического ядра в центре планеты.

Телевизионные съемки производились «Маринером-10» с различных расстояний, и наиболее высокое разрешение составило 50 м. Поверхность Меркурия очень похожа на поверхность Луны (рис. П.1).

Равнины, подобные лунным морям, чередуются с материковыми районами. И те и другие покрыты бесчисленными ударными кратерами. Однако моря занимают относительно меньшую площадь, чем на Луне. Характерная для Меркурия деталь — гигантские уступы высотой около 3 км и длиной в сотни и тысячи километров, извилистые трассы которых пересекают кратеры и межкратерные области. Их образование связывают со сжатием планеты. Непрерывность морфологического ряда кратеров от свежих до очень сглаженных, наличие первичных и вторичных кратеров свидетельствуют о том, что на Меркурии происходит разрушение поверхности того же типа, как на Луне.

¹ Сюрпризы Вселенной. — Известия, 1979, 7 февр., с. 3.

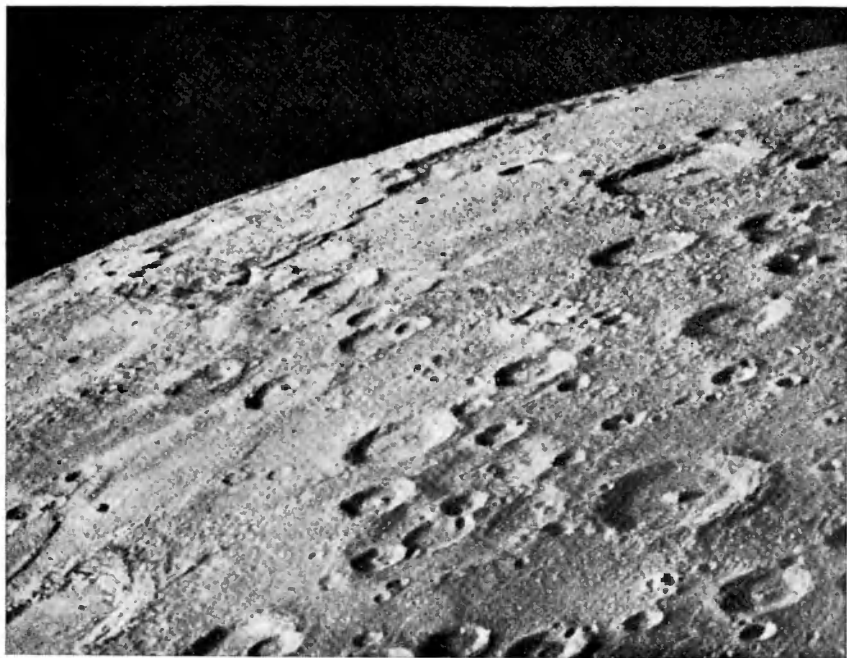


Рис. П.1. Поверхность Меркурия, снятая с расстояния 35 000 км

Анализ кратерной сети привел к выводу о том, что возраст поверхности Меркурия 4—4,6 млрд. лет. При определении этих значений был использован опыт вычисления возраста Луны [1].

Грунты Меркурия очень темные. Днем их поверхность нагревается в среднем до 345°C , но уже через 2 ч после захода Солнца охлаждается до -140°C , а ночью до -180°C . Грунты мало-теплопроводны и уже на глубине нескольких десятков сантиметров слабо изменяющаяся температура не превышает $70-90^{\circ}\text{C}$. Такие грунты могут быть мелкодисперсными продуктами ударного измельчения коренных пород, подобно лунному реголиту. Возможно, что они образовались из анортозитовых пород, а темная окраска вызвана облучением протонами солнечного ветра. Спектр отражения Меркурия совпадает с лунным, что указывает на близость химического и минералогического состава поверхностного слоя грунтов обоих небесных тел.

К Венере в 1961—1978 гг. были запущены станции «Венера-1—12» (СССР) и «Маринер-2, -5, -10», «Пионер — Венера» (США). Большинство экспериментов было посвящено изучению атмосферы, но проводились также определения диэлектрической проницаемости и плотности поверхностных слоев грунта. Автоматические станции «Венера-7—10» опустились в 1970, 1972 и

1975 гг. на поверхность планеты и передали результаты прямых определений свойств грунтов и первые панорамы Венеры [1, 3—5].

Ускорение силы тяжести на поверхности Венеры 887 см/с^2 , т. е. 90,5% земного. Средняя плотность Венеры $5,24 \text{ г/см}^3$ мало отличается от земной.

Облачный покров не позволяет фотографировать поверхность планеты, и первые сведения о рельефе Венеры получены радиолокационными измерениями с Земли. Станции «Венера-8» и «Венера-10» излучали радиоволны, которые после отражения от поверхности Венеры принимались на Земле. Параметры отраженных волн дают возможность определить превышение или занижение изучаемой местности относительно условной сферической поверхности планеты и получить данные о ее рельефе [6, 7].

Радиолокационные наблюдения выявили два типа поверхности: один (с уклоном не более 1°) соответствует венерианским морям, второй (с уклоном более 2°) — предгорьям и горным районам. Высоких гор не обнаружено. Максимальные перепады высот в изученных районах не более 3 км, а средняя крутизна склонов длиной в несколько десятков километров не более 5° . В экваториальной области обнаружены кольцевые кратеры диаметром 35—150 км, глубина которых не более 0,3% от диаметра, в то время как на Луне, Меркурии и Марсе она достигает 3—5%. Микрорельеф более гладкий, чем на Луне.

Академик В. А. Амбарцумян, говоря об исследованиях Венеры (см. сноску 1), отмечает: «Большинство астрономов считало, что на поверхности этой планеты все образования типа гор и скал должны быть давно выветрены благодаря воздействию на них мощной плотной атмосферы. Однако советские астрономы считали вероятным, что процессы выветривания не успевают выравнять следы вулканической деятельности на поверхности Венеры. Данные, полученные с помощью советских научных станций «Венера», оказались в полном согласии с этим представлением».

Давление у поверхности Венеры 90—95 атм, а температура $465\text{—}475^\circ \text{C}$. Плотность ее атмосферы в 65 раз выше земной. Только чрезвычайно большие метеориты могут пробиться через такую атмосферу, и от эрозии мелкими и мельчайшими частицами поверхность Венеры надежно защищена.

Атмосфера состоит в основном из углекислого газа, содержание азота вместе с инертными газами по объему не превышает 2%. Содержание водяного пара по разным методам определения колеблется от 0,0001 до 0,1%, а кислорода не более 0,001% по объему. Несмотря на облака, освещенность поверхности планеты достаточно велика. Высокая температура обусловлена «парниковым эффектом» углекислого газа. Суточные колебания температуры у поверхности не более 1°C , скорость ветра 0,4—1,2 м/с, но на высоте 55 км, где температура и давление

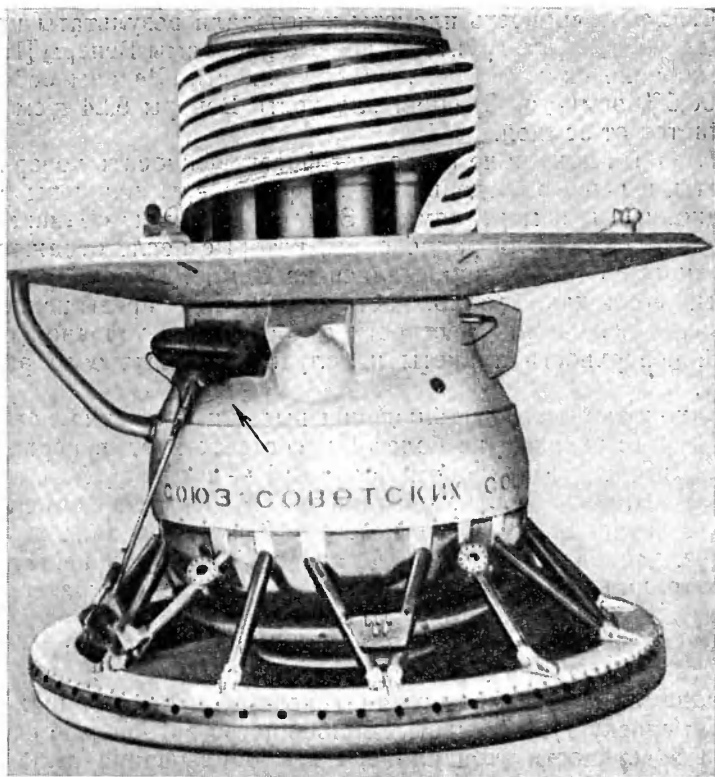


Рис. П.2. Спускаемый аппарат станции «Венера-9»

Стрелкой указан датчик плотнoмера

примерно такие же, как у поверхности Земли, ветер достигает скорости 100 км/ч. Облака, видимо, состоят из мельчайших капелек концентрированной серной кислоты, осадки не выпадают. Воды на поверхности нет, и водная эрозия, так же как и дробление метеоритами, исключена.

Получение фотографий поверхности Венеры представляет собой выдающееся научное и техническое достижение СССР. До полета «Венеры-4» вообще отсутствовали сколько-нибудь достоверные данные об условиях в нижних слоях атмосферы планеты и освещенности поверхности. Спускаемый аппарат «Венеры-4» разрушился на высоте 23 км при давлении 176 Н/см². Станции «Венера-5 и -6» опустились до высоты 17 км, «Венера-7 и -8» достигли поверхности и зарегистрировали давление в 930 Н/см² и температуру 477°С. Спуск «Венеры-8» показал, что в районе утреннего терминатора освещенность составляет сотни люкс и фотографирование вполне осуществимо. Было оп-

ровергнуто мнение о том, что на поверхности Венеры стоит вечная ночь. Исключительно прочная и надежная конструкция спускаемых аппаратов «Венеры-9 и -10» (рис. П.2) гарантировали телепередачу в течение одного часа [1].

Первые телепанорамы поверхности Венеры были переданы станциями «Венера-9 и -10» в октябре 1975 г. «Венера-9» опустилась вблизи экватора. На снимке видно нагромождение отдельных камней и глыб. Отмечается обилие камней крупностью в несколько десятков сантиметров. Картина в целом похожа на каменные осыпи Земли, которые встречаются у подножия разрушающихся скал. Станция «Венера-9» стоит на склоне крутизной в 30° . Возможно, что она попала именно на осыпь на склоне венерианской горы [1].

Станция «Венера-10» опустилась в 2200 км от «Венеры-9» на обширную плоскую каменную плиту. Плита разделена трещинами без смещения фрагментов. Впадины заполнены мелкощебеночным материалом. Поверхность делится на светлые и темные фрагменты, причем видно, что светлые образования несколько выступают из темных (рис. П.3).

В. С. Авдучевский² считает, что видные на снимках плоские камни недавнего происхождения, они лежат в один ряд и поверхность их не запылена. В промежутках между камнями грунт темный, что характерно для очень шероховатых или покрытых пылью объектов. В месте посадки «Венеры-9» камни мельче и сильнее выступают над поверхностью, чем глыбы у «Венеры-10». Можно предположить, что каменная корка на поверхности планеты способна растрескиваться за счет каких-то тепловых процессов или воздействия агрессивной атмосферы. А. П. Виноградов и его сотрудники полагают, что поверхность Венеры покрыта легкоплавким базальтовым материалом.

Радиометрическое определение состава горных пород поверхности показало их содержание: 0,3% калия, 0,00005—0,00006% урана и 0,000007—0,000036% тория, что характерно для базальта. Большой разницы в содержании этих элементов в обоих местах посадки нет [1].

Плотность каменных пород, определенная «Венерой-9 и -10», равна $2,7 \pm 0,1$ г/см³. На расстоянии 10 м в глубину она возрастает по радиолокационным данным на 10%.

Разрушение горных пород микрометеоритами на Венере исключено. Температурные колебания очень малы и также не могут вызвать существенного дробления камней, лежащих на поверхности. Большая плотность атмосферы приводит к тому, что ветер скоростью всего в 5 м/с будет действовать на поверхность с силой земного урагана, но измерения показали, что скорость ветра не превышает 1,2 м/с. При температуре 374°C вода при

² Новое о Венере.— Известия, 1975, 27 окт., с. 3.

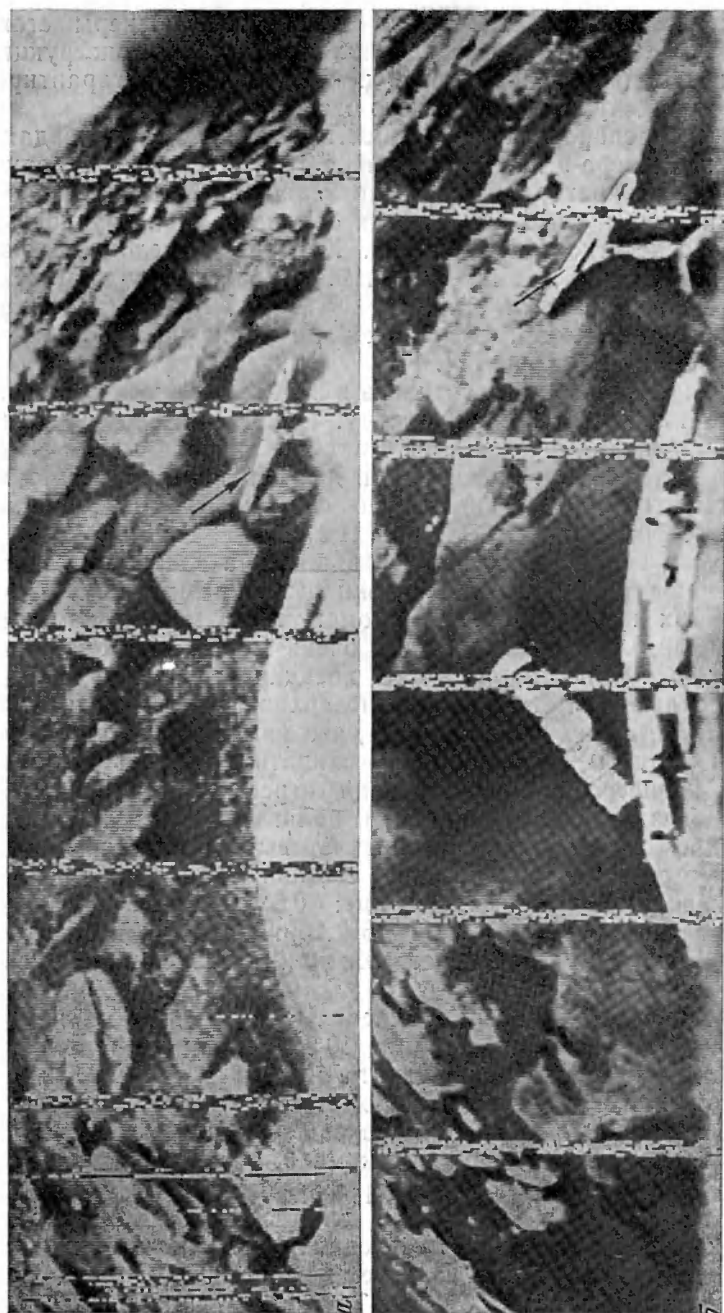


Рис. П.3. Поверхность Венеры в местах посадки спускаемых аппаратов станций «Венера-9» (а) и «Венера-10» (б). Светлые сегменты в нижней части панорам — части посадочных устройств. Стрелками указаны радиационные плотнометры. Светлая полоса из пяти секций на нижнем снимке — сброшенная деталь аппарата

любом давлении не может быть в жидкой фазе, что исключает выпадение дождей и водную эрозию.

Однако при высоких давлении и температуре, которые наблюдаются на поверхности Венеры, могут происходить активные химические реакции горных пород с углекислым газом.

Была сделана попытка оценить механические свойства камней, лежащих на поверхности Венеры, путем анализа процесса соударения корпуса плотномера с грунтом и по характеру расположения отдельных камней. В пределах разрешающей способности телефотометра «Венеры-9» (0,5 см) заметной деформации грунта не произошло. Сжимающие напряжения в зоне контакта плотномера с выпуклой поверхностью камня при деформации менее 0,5 см имеют величину не менее $1,9 \text{ кН/см}^2$, а модуль деформации камня должен быть не менее 7 кН/см^2 .

На панораме, переданной «Венерой-10», видно, что под левым краем плотномера могло произойти откалывание части камня. Отколовшийся кусок виден в нижней части снимка и представляет собой относительно тонкую пластинку.

Макет плотномера проходил испытания на Земле при соударении с земными грунтами различного состава и прочности.

Наибольшее сходство с картинами, полученными на Венере, наблюдается при сопоставлении с результатами соударения макета со скальными и полускальными грунтами. Нижний предел прочности этих пород $0,5\text{—}1,0 \text{ кН/см}^2$. По-видимому, камни, снятые на Венере, имеют не меньшую прочность.

Для средней плотности грунта Венеры, равной $2,3 \pm 0,4 \text{ г/см}^3$, прочность будет составлять от 2,4 до 14 кН/см^2 . Мелкозернистые грунты могут иметь значительно меньшую прочность.

На протяжении 14 лет полеты к Марсу совершили 15 автоматических аппаратов и станций, запущенных с Земли. Первым отправился в путь 1 ноября 1962 г. советский «Марс-1», за ним последовали автоматический «Зонд-2» и «Марс-2—7», а также американские «Маринер-3—5, -7, -9». Эти аппараты осуществили фотографирование Марса и изучение его атмосферы и поверхности с пролетных и орбитальных траекторий. «Марс-3» и «Марс-6», кроме того, произвели спуск на планету автоматических станций». В 1976 г. спускаемым станциям США «Викинг-1» и «Викинг-2» удалось получить первые панорамы поверхности Марса и провести исследования грунтов.

Информация, полученная автоматическими станциями с Марса, настолько обширна, что изложить ее даже вкратце невозможно. Укажем, что на Марсе открыты вулканы высотой до 16 км, выявлены гигантские сухие русла глубиной до 6 км и шириной до 240 км, обнаружены разветвленные долины с характерными извилистыми руслами высохших рек. На поверхности отчетливо видны следы ветровой эрозии и найдены районы, по-

крытые эоловыми отложениями, схожими с барханами земных пустынь.

Получены веские доводы в пользу существования весьма значительных толщ вечномерзлых грунтов, обнаружен лед.

Почти половина поверхности Марса занята древними террасами, усеянными ударными кратерами, среди которых окруженная равнина Хеллас вдвое превышает по площади самое большое из морей Луны. Остальная часть планеты покрыта вулканическими образованиями и большими равнинами осадочного происхождения [22, 28].

На Марсе обнаружен вулканизм. Вулканы распределены неравномерно и преобладают в одном из полушарий планеты. Вулканическая деятельность, видимо, проходила на протяжении всей дешифрируемой истории Марса. Щитовые вулканы Марса больше земных [24].

В районе области Тарсис обнаружены четыре гигантских вулканических конуса. Самый большой из них — гора Олимп высотой 27 км и диаметром у подошвы 600 км. На вершине Олимпа находится вулканическая кальдера поперечником в 70 км с высоким валом. Расположенная южнее гора Арсия имеет кальдеру диаметром 130 км [1].

Лавовые потоки прослеживаются во многих местах. Равнина к югу и юго-западу от вулкана Арсия сложена длинными потоками лавы, которые прослеживаются на сотни километров. Вблизи от вулкана их ширина 5 км, на расстоянии более 400 км доходит до 40—60 км. Возраст потока тем больше, чем дальше от вулкана [28]. Строение некоторых потоков указывает на малую вязкость лавы, похожей по геологическим свойствам на базальтовую.

Метеоритные ударные кратеры на Марсе (рис. П.4) значительно более разнообразны по форме, чем на Луне и Меркурии. Помимо кратеров, подобных этим небесным телам, которые достаточно часто попадают и на Марсе, там были обнаружены и другие.

Большой кратер с центральной горкой и кольцевым валом (рис. П.4) резко отличается от лунных и меркурианских кратеров тем, что окружен как бы выплеснувшимся из него и затем застывшими грязевыми потоками, которые могли возникнуть при мгновенном расплавлении больших масс вечномерзлых грунтов при ударе.

На снимках Марса можно видеть характерное только для этой планеты явление обтекания потоками выброшенных из кратера материалов различных вертикальных препятствий. Можно предположить, что баллистически выброшенный материал затем продолжал замедленное движение по поверхности в составе грязевого потока, возникшего за счет плавления вечной мерзлоты.

Внутренние части кратеров Марса напоминают лунные и

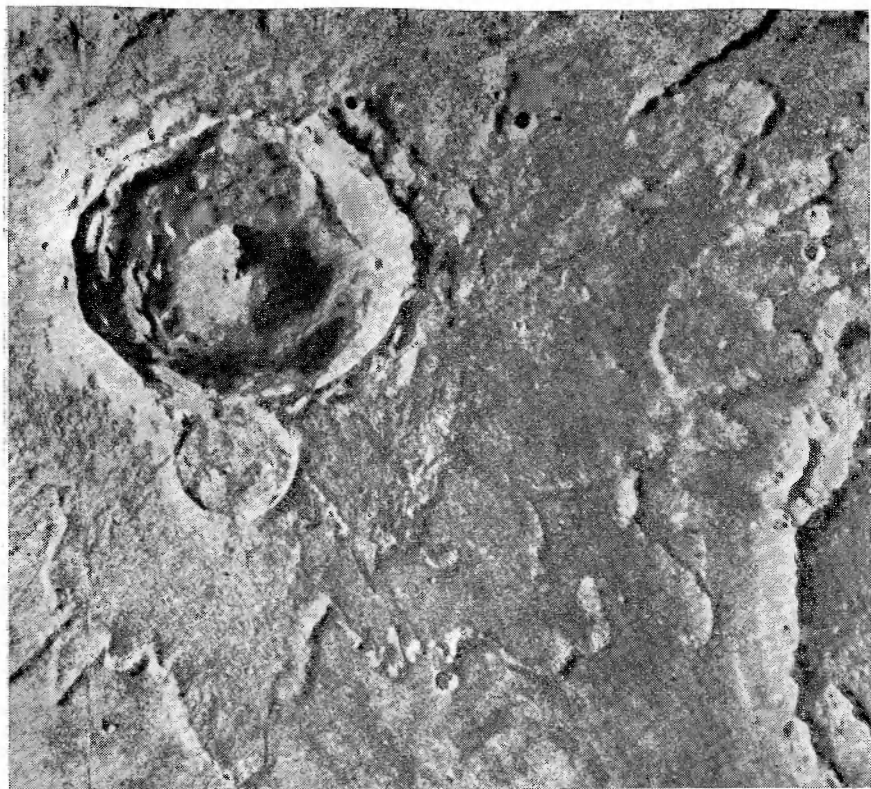


Рис. П.4. Ударный кратер на Марсе

Диаметр 18 км. Окаймлен несколькими слоями отложений с валами по контурам, которые, возможно, возникли в результате расплавления вечномерзлого грунта при ударе

меркурианские, но переход от котлообразных кратеров к кратерам с плоским дном приходится на диаметр около 5 км, т. е. меньший, чем на Луне и Меркурии [30].

На присутствие вечной мерзлоты указывают топографические особенности, характерные для приполярных областей Земли, которые возникают в результате термокарстов, солифлюкции и выхода на поверхность грунтовых вод при оттаивании мерзлых грунтов.

На рис. П.5 показан хаотический рельеф поверхности Марса к северу от области Элизиум. Кратер справа имеет диаметр в 13 км.

Вечная мерзлота может распространяться на глубину в несколько километров [27]. Полигональные трещины и желоба,



Рис. П.5. Хаотический рельеф, возникший, как предполагают, в результате деградации вечной мерзлоты в районе области Элизинум

заполненные осадками, видные на снимках, могли образоваться в результате деградации вечной мерзлоты, как на Земле [32].

В экваториальном поясе планеты развита система великих каньонов, сравнимых по своим размерам с восточноафриканской системой рифтовых долин на Земле (рис. П.6). На дне больших каньонов Марса видны отмели и перекаты, которые могли образоваться только в речных руслах. Широкие русла берут начало в области так называемых провальных долин и направлены вдоль южных горных хребтов. Провальные долины могли возникнуть в результате глубокого оттаивания вечномерзлых грунтов под действием вулканических процессов. При этом высвобождались колоссальные объемы воды, которые смогли проложить себе широкие и глубокие русла [23, 29]. С оттаиванием мерзлоты, по-видимому, связаны оползни, следы которых обнаружены во многих местах.

Извилистые русла значительно меньших сечений с многочисленными притоками вряд ли имеют геотермическое происхождение. Они могут образоваться в периоды потепления климата.

Имеются широко разветвленные дендритные сети сухих русел, которые начинались в отдельных кратерах и исчезали в низменностях, видимо, в результате впитывания или испарения воды. Такие русла могут иметь дождевое происхождение.

Возраст русел оценивается от 0,5 до 3,5 млрд. лет. Не исключено, что вулканизм провоцировал большие наводнения и короткие межледниковые периоды. Дождевые осадки могли выпадать в эти периоды также под влиянием повышения солнечной активности [29]. Вода могла появляться и исчезать на Марсе многократно.



Рис. П.6. Участок гигантского сухого русла (долина Маринера)

Ширина русла порядка 150 км, длина более 3000 км, длина протоков до 300 км. Судя по топографии, овраги возникли от выхода грунтовых вод, а не от поверхностного стока

Многочисленные данные об атмосфере и грунтах Марса опубликованы в источниках [8—19] и в кратком изложении приводятся ниже. По измерениям станций «Марс-3, -5, -6, -7» и «Маринера-9» давление атмосферы у поверхности планеты колеблется от 3 до 9 мбар и составляет в среднем около 6% от земного. Она состоит из аргона, азота, углекислоты, кислорода, озона и водяного пара в очень малых долях. Слой осажденной влаги меняется с течением времени и в 1971 г. составлял 1—5 мкм, а в 1974 г. — 60—70 мкм.

В отличие от Венеры атмосфера Марса практически не задерживает уходящее тепловое излучение. Температура поверхности днем в экваториальных районах доходит до 30°С, а ночью опускается до —90°С. Измерения «Марса-6» в 1974 г. показали максимум днем —1°С, при заходе Солнца —45°С и минимум —73°С ночью. «Викинг-1» определил дневную температуру —31°С и вскоре после захода Солнца —86°С.

По мнению Мазурски, Марс находится сейчас в периоде оледенения, которое, возможно, и является нормальным для него состоянием. Но в атмосфере Марса могут происходить вообще весьма резкие изменения и временами климат планеты может значительно смягчаться. МкЭлрой из Гарвардского университета считает, что около 3 млрд. лет назад атмосфера Марса была похожа на земную и на планете выпадали дожди, питающие реки. В настоящее время съемки орбитальных аппаратов «Викинг» обнаружили только ледяные туманы и конденсирующийся из них лед. Жидкой влаги на поверхности нет. Белая шапка на северном полюсе, по мнению Фармера и Кифера, состоит из льда. Углекислота вымерзает из атмосферы Марса при температуре —128°С и может создавать временные отложения сухого льда в полярных областях в зимние периоды. По приближенным оценкам запасы льда в северной полярной шапке составляют 33 000 км³ (рис. П.7).

Несмотря на низкое атмосферное давление, весьма высокие скорости ветра, в особенности в периоды общепланетных пылевых бурь, способствуют интенсивному переносу песчано-пылевых частиц и созданию в отдельных местах барханов и дюн, весьма напоминающих земные (рис. П.8).

Для подъема пыли на Марсе необходима скорость ветра 30—50 м/с, а для ее переноса — не менее 70 м/с. Благодаря низкой температуре и более высокому молекулярному весу скорость звука в атмосфере Марса меньше земной и скорости ветра могут приближаться к околосвуковым. Высота запыленного слоя во время бурь достигает 15—20 км, а общее количество пыли, поднятое во время великой бури 1971 г., оценивается в 1 млрд. т. Отдельные частицы пыли могут быть очень мелкими — порядка 0,1—0,2 мкм. Именно они придают атмосфере Марса розовый цвет и большую яркость. Но при выпадении на поверхность они слипаются в агрегаты крупностью до 1 мм [1].



Рис. П.7. Ледники в полярной области Марса по снимку «Маринера-10»

Наибольшее число данных о Марсе получено станциями «Викинг-1 и -2» в 1976—1977 гг. [1, 12, 18—21]. Каждая из них состоит из орбитального аппарата и спускаемой автоматической станции. Орбитальный аппарат выходит на эллиптическую орбиту вокруг Марса и производит съемку и исследования атмосферы и поверхности планеты установленными на нем приборами, а также используется как ретранслятор для передачи на Землю сигналов спускаемой станции.

Спускаемая автоматическая станция оборудована приборами для определения состава, давления и температуры атмосферы и измерения скорости и направления ветра. Имеется аппаратура для химического анализа органических веществ в атмосфере и грунте, сейсмометр и установка для поиска признаков жизни. Последняя оборудована тремя независимыми приборами для обнаружения явлений фотосинтеза, газообмена и обмена ве-

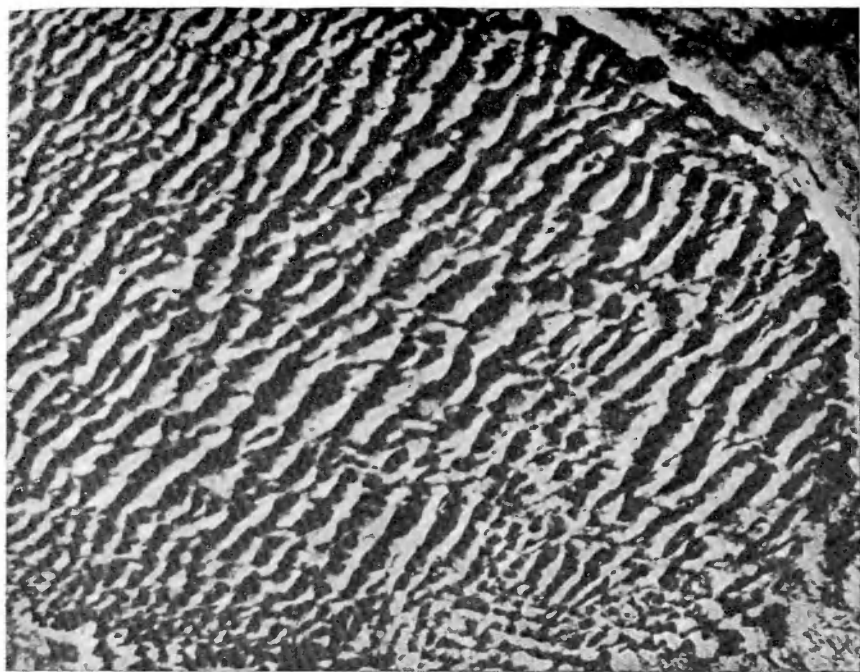


Рис. П.8. Барханный рельеф, созданный эоловыми процессами на Марсе

ществ. Два телефотометра для цветной съемки поверхности грунта способны различать частицы крупностью в 1 мм непосредственно у шасси аппарата и крупностью 15 см на расстоянии 30 м (рис. П.9).

Манипулятор для отбора проб грунта (рис. П.10) имеет телескопическую стрелу длиной 3 м, которая может охватить площадь в 8,8 м², на ней укреплена головка для разработки грунта, магнит и щетки. Прилипшие к магниту и щеткам частицы затем рассматриваются через увеличительное зеркало телевизионными камерами. Пробы грунта подаются грунтозаборником в три разных бункера, откуда они поступают на анализ. Часть проб измельчалась особым механизмом.

Спускаемый аппарат «Викинг-1» совершил посадку 20 июля 1976 г. на равнине Хрис, которая представляла собой вулканическую местность с волнистым рельефом (рис. П.11). Обнажения скальных пород расположены вдоль нескольких хребтов. Местность усеяна большим количеством скальных обломков, число которых превышает обычное для выбросов из ударных кратеров. Обломки представлены разными типами, что говорит

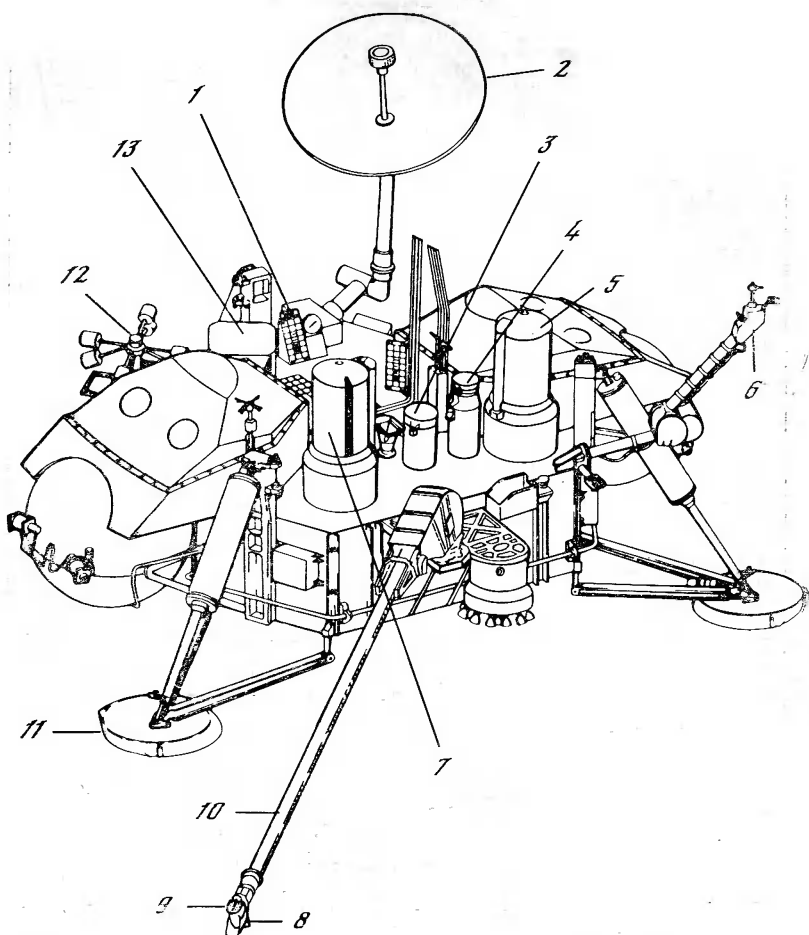


Рис. П.9. Схема спускаемого аппарата станций «Викинг-1 и -2»

1 — фотомишень телекамеры; 2 — антенна с высоким разрешением; 3 — биологический процессор; 4 — газовый хроматограф и масс-спектрометр; 5 — телекамера; 6 — метеорологические датчики; 7 — телекамера; 8 — магнит; 9 — головка грунтозаборника; 10 — телескопическая стрела; 11 — опора; 12 — антенна УВЧ; 13 — сейсмометр

об их выветривании на месте. Мелкозернистые отложения имеют характер эоловых наносов [16].

Телефотосъемка, проведенная «Викингом-1», показала, что одна из трех опор аппарата попала на мелкодисперсный рыхлый грунт, а вторая — на более жесткую каменистую россыпь. В каменистой россыпи около $\frac{1}{4}$ поверхности занято обнаженными и частично заглубленными камнями крупностью от 2 см до нескольких дм, между которыми виден мелкозернистый грунт

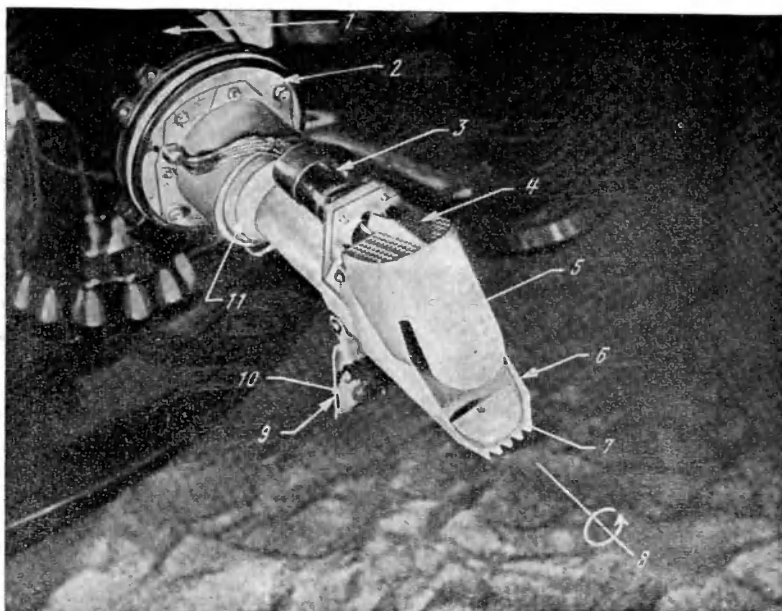


Рис. П.10. Рабочий орган манипулятора спускаемых аппаратов «Викинг-1, -2»

1 — телескопическая стрела; 2 — фланец; 3 — соленоид верхней челюсти; 4 — сито 2 мм; 5 — верхняя челюсть; 6 — нижняя челюсть; 7 — зубья; 8 — поворот на 180°; 9 — лопатка; 10 — магниты; 11 — шарнир

в виде ветровых отложений. Местами он сдут и обнажены гравелистые частицы крупностью до 5 мм. Вокруг опоры № 2 лежит очень мягкий мелкозернистый грунт, в который опора погрузилась и проскользнула на глубину 16,5 см, причем на поверхности образовались складки и трещины на расстоянии до 60 см от опоры. Опора № 3 могла вдавливаться глубоко в каменистую россыпь. Вокруг нее слой мелкозернистого грунта тонкий и неравномерный. Видны отдельно выходы скалы на расстоянии нескольких метров от аппарата (рис. П.12).

Струя тормозного двигателя аппарата вызвала эрозию поверхности и отбросила отдельные камни. С помощью манипулятора проводилось рытье траншей глубиной до 6 см, причем в двух случаях намеченной глубины не удалось достигнуть, видимо, из-за встречи со скалой. Одна из траншей достигла 25 см в глубину [20].

30 сентября 1976 г. на расстоянии в 7400 км от «Викинга-1» на равнине Утопия опустился спускаемый аппарат «Викинг-2» (рис. П.13). Несмотря на значительное расстояние и другой географический пояс планеты, местность оказалась похожей на равнину Хрис и представляла собой плоскую равнину, сложен-



Рис. П.11. Крупный обломок (слева), золотые отложения и каменистая россыпь на поверхности Марса в районе равнины Хрис по снимку спускаемого аппарата «Викинг-1»

ную мелкозернистыми отложениями, поверх которых разбросаны камни. Мелкозем, возможно, принесен из полярных областей, а камни выброшены из кратера Майе, но могут быть и остатками лавового потока. На снимках видны полигональные желоба, заполненные мелкозернистым материалом [32].

Одна нога аппарата частично попала на скалу, а вторая, возможно, коснулась скалы. Во всяком случае, глубина погружения опор составила 0,3 и 0,25 см, т. е. была очень малой.

При работе манипулятора наблюдалось образование валов с трещинами и без трещин, а также образование комков. Повреждения камней крупностью до 25 см не наблюдалось [20].

Механические свойства грунтов определялись прямыми и косвенными методами с использованием опыта работы автоматических станций на Луне. Пористость оценивалась по диэлектрической постоянной при радиопросвечивании и наблюдениям за характером деформаций поверхности грунта. Гранулометрический состав крупнообломочного грунта анализировали по фотоснимкам, а мелкозернистого — по деталям отпечатков различных тел и по воздействию газовых струй. Кроме того, на станциях в разных блоках были установлены сита с крупностью ячеек 0,3; 1 и 2 мм. Наконец, о гранулометрии можно было судить по воздействию ветра на поверхность грунта, которое обнаруживается при многократном фотографировании одних и тех же участков поверхности. Угол внутреннего трения и сцепление

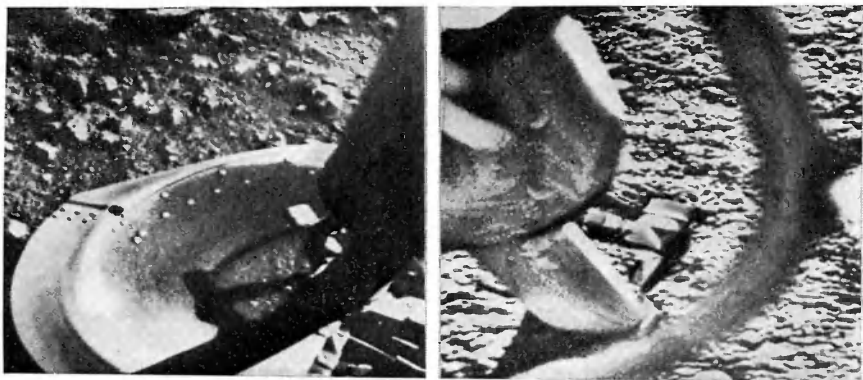


Рис. П.12. Опоры спускаемого аппарата «Викинг-1»

Слева — на каменистом участке, справа — на участке мелкозернистого грунта в районе равнины Хрис

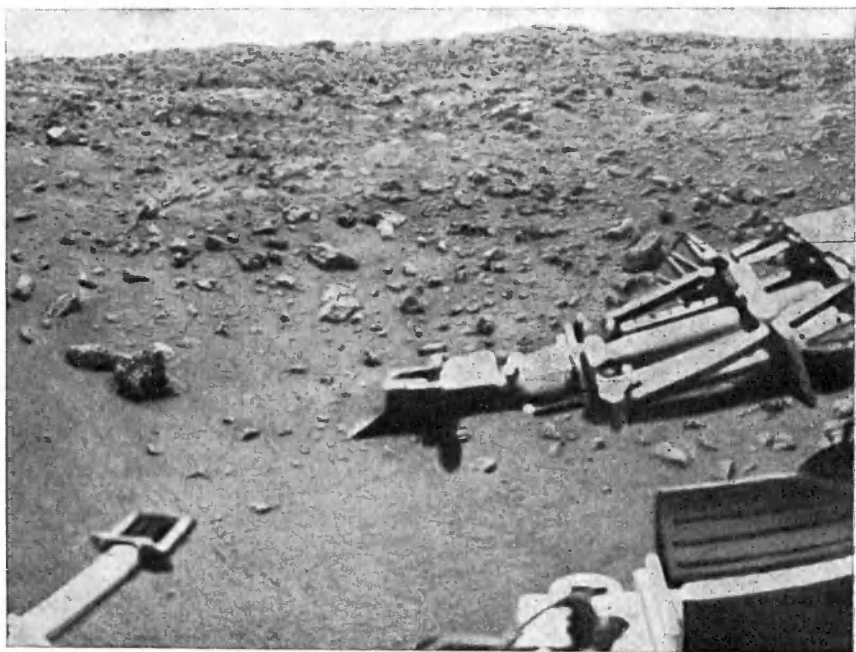


Рис. П.13. Панорама поверхности в месте посадки спускаемого аппарата «Викинг-2»

Справа сверху манипулятор с пробоотборником в сложенном положении

Т а б л и ц а П.1
Состав и механические свойства марсианских грунтов

Станция	Грунт	Содержание на поверхности, %		Плотность, г/см ³		Сцепление, Н/м ²		Сопротивление вдавливанию опор, Н/м ²	Адгезия к металлу, Н/м ²	Коэффициент трения и скольжения опор по грунту
		частиц >2 см	комков и камней	мелкозема	каменной	мелкозема	скалы			
«Викинг-1»	Рыхлый мелкозернистый	0	100	1,0—1,6	—	10—10 ²	—	3·10 ⁵	1—10 ²	0,3—0,5
	Каменный	25	75	1,2—1,6	2,9	10—10 ⁴	>10 ⁴	6·10 ⁶	—	0,3—0,5
«Викинг-2»	Каменный	20	80	1,1—1,48	2,6	10—10 ³	>10 ⁴	6·10 ⁶	—	—

Т а б л и ц а П.2
Осредненный химический состав мелкозернистых марсианских грунтов

Окислы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Cl	Микроэлементы	Rb	Sr	Y	Zr
Содержание окислов и точность их определения в % по весу	44,0	5,6	18,8	8,45	5,4	<0,3	0,93	8,3	7,5	Содержание микроэлементов в промиллях по весу				
	±5,3	±1,7	±2,9	+4,1	±1,1		±0,3	±0,2	±0,3		≤30	80±35	60±30	30±10

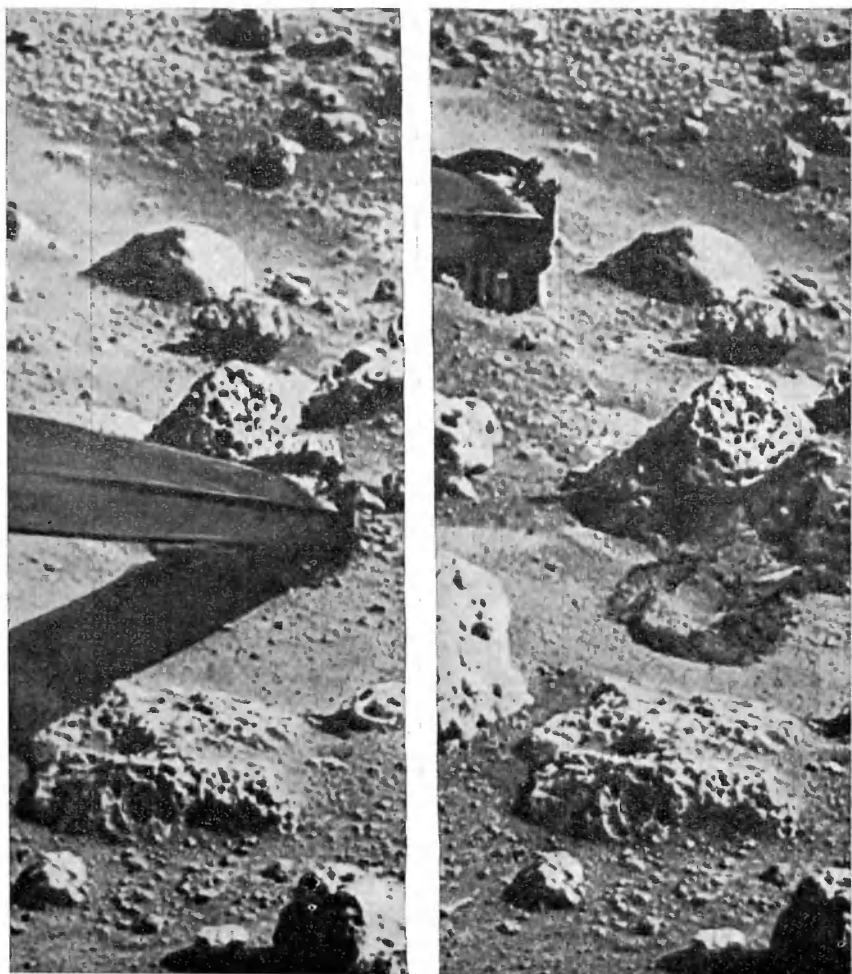


Рис. П.14. Шлаковидные пористые камни в месте посадки «Викинга-1»

оценивались по динамике взаимодействий опор с грунтом и работе манипулятора. Адгезия к металлу определялась по налипанию частиц на манипулятор. При расшифровке результатов опыта использовались данные тарировочных испытаний на Земле. Исследования станций «Викинг-1 и -2» привели к получению характеристик структуры и механических свойств марсианских грунтов (табл. П.1) [20]. Мелкозем на поверхности Марса по гранулометрическому составу содержит более 25% частиц крупнее 2 мм, т. е. формально он относится к гравелистому песку. Однако содержание пылеватых частиц сильно меняется от пунк-

та к пункту, что может быть связано с их выдуванием из поверхностного слоя. Состояние грунта от очень рыхлого до среднеплотного, сцепление — маленькое, но угол внутреннего трения $30\text{—}45^\circ$ лежит в обычных пределах для песчано-гравелистых грунтов.

Механические свойства марсианских грунтов согласно [1] связаны с формированием их при осаждении из атмосферы. Скорость осаждения частиц крупностью около 0,1 мм составляет в атмосфере Марса около 0,5 м/с. При такой скорости образуется рыхлая непрочная структура. Но при скорости осаждения 4—5 м/с возникает относительно плотная структура с несущей способностью порядка $3\text{—}5 \text{ Н/см}^2$.

В работе В. И. Мороза [8] предлагается иерархическая структура грунта — мелкие частицы, объединенные в гранулы, которые должны легко распадаться и объединяться. Л. В. Ксанфомалити [13] рассматривает возможный механизм слипания эоловых частиц в гранулы, связанный с возможными сильными трибозлектрическими явлениями, повышающими адгезионные свойства грунта из-за сухости марсианской атмосферы.

По химическому составу грунтов имеются данные (табл. П.2), полученные с помощью анализа проб, взятых манипуляторами «Викингов-1 и -2» [33].

На поверхности лежит мелкозернистый силикатный материал, включающий окислы железа или перемешанный с ними. Происхождение его скорее всего мафическое. Состав этого материала в местах посадки обеих станций «Викинг» идентичен. По-видимому, эоловые процессы привели к перемешиванию и гомогенизации мелкозернистых грунтов разного происхождения по всей планете.

В мелкозернистых отложениях присутствуют богатые железом смектиты или продукты их деградации, включая магнетит и в меньших количествах карбонаты типа кальцитов и сульфаты, цементирующие мелкие зерна. Карбонаты и сульфаты могли появиться в результате миграции на поверхность планеты с грунтовыми водами и последующего испарения влаги.

В американской литературе [20] отмечается, что на снимках «Викингов» не было достоверно обнаружено песчаных фракций. Основным типом мелкозема является пылеватый грунт, напоминающий тонкую муку. Одно из объяснений этого состоит в возможности дробления и поверхностного износа частиц при переносе ветром и соударениях с камнями. Другое объяснение базируется на предположении о существовании на Марсе в далеком прошлом воды в жидкой фазе, а следовательно, гидрохимических процессов выветривания и тонкого измельчения коренных пород. На снимках «Викингов» видны во множестве пористые камни, по своей структуре напоминающие куски вулканического шлака (рис. П.14). Да и в целом ландшафты равнин Хрис и Утопия очень похожи на вулканические ландшафты вокруг действующих вулканов Земли.

ЛИТЕРАТУРА

К главе 1

1. Грунтоведение/Е. М. Сергеев, Г. А. Голодковская, Р. С. Зиянгиров и др. М.: Изд-во МГУ, 1971.
2. Виноградов А. П. Дифференциация вещества Луны.— В кн.: Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975, с. 5.
3. Рускол Е. Л. Происхождение Луны. М.: Наука, 1975.
4. Фрондэйл Д. Минералогия Луны. М.: Мир, 1978.
5. Луна/Под ред. С. Ранкорна, Г. Юри. М.: Мир, 1975.
6. Мейсон Б., Мейсон У. Лунные породы. М.: Мир, 1973.
7. Космохимия Луны и планет/Отв. ред. А. П. Виноградов. М.: Наука, 1975.
8. Жарков В. Н. Введение в физику Луны. М.: Наука, 1969.
9. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1978.
10. Космонавтика. М.: Сов. энциклопедия, 1970.
11. Первые итоги определения физико-механических свойств грунта Луны/И. И. Черкасов, В. В. Михеев, М. И. Смородинов и др. М.: Стройиздат, 1970.
12. Баженев В. И., Осин М. И. Посадка космических аппаратов на планеты. М.: Машиностроение, 1978.

К главе 2

13. Барабашев Н. П., Чекирда А. Т. О горных породах, наиболее соответствующих тем, которые входят в состав лунной поверхности.— Изв. Комиссии по физике планет, 1959, вып. 1, с. 50.
14. Луна/Под ред. А. В. Маркова. М.: Физматгиз, 1960.
15. Марков А. В. Результаты исследования Луны и строение верхнего слоя ее коры.— Изв. ГАО, 1965, 24, № 178, вып. 2, с. 162.
16. Новое о Луне/Под ред. А. А. Михайлова. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963.
17. Орлова Н. С. Сравнение закона отражения света для Луны и некоторых видов горных пород.— Вестн. ЛГУ, 1957, 12, № 1, с. 152.
18. Сытинская Н. Н. Природа Луны. М.: Физматгиз, 1959.
19. Шаронов В. В. Природа планет. М.: Физматгиз, 1958.
20. Болдуин Р. Что мы знаем о Луне. М.: Мир, 1967.
21. Gold T. Structure of the Moon surface.—In: The Lunar Surface Layer. New York: Acad. Press, 1964, p. 345.
22. Kuiper G. P. Lunar results from Ranger 7 to 9.—Sky and Telesc., 1965, 29, N 5, p. 293.
23. Physics and Astronomy of the Moon/Ed. Z. Kopal. New York: Acad. Press, 1965.
24. Urey H. C. The origine of the Moon's surface features.—Sky and Telesc., 1956, 15, N 3, p. 108.
25. Троицкий В. С., Тихонова Т. В. Тепловое излучение Луны и физические свойства ее верхнего покрова.— Изв. вузов. Радиофизика, 1970, 13, № 9, с. 1273.
26. Кротиков В. Д., Троицкий В. С. Радиоизлучение и природа Луны.— Усп. физ. наук, 1963, 81, вып. 4, с. 589.
27. Атлас обратной стороны Луны. М.: Наука, 1967. Ч. 2.
28. Козырев Н. А. Спектральные доказательства существования вулканических процессов на Луне.— В кн.: Новое о Луне. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963, с. 199.
29. Рускол Е. Л. Физические свойства лунной поверхности.— Космич. исслед., 1965, вып. 3, с. 395.
30. The Lunar Surface Layer: Materials and Characteristics/Ed. by L. W. Salisbury, P. Glaser. New York: Acad. Press, 1964.
31. Бондаренко Л. Н., Лейкин Г. А. Исследование физических свойств лунной поверхности в СССР.— Астрон. вестн., 1970, 4, № 3, с. 145; № 4, с. 209.

32. *Базыкин В. В.* Советские искусственные спутники Земли, космические летательные аппараты и их характеристики.—В кн.: *Успехи СССР в исследовании космического пространства*. М.: Наука, 1968, с. 449.
33. *Виноградов А. П., Сурков Ю. А., Чернов Г. М.* и др. Измерение гамма-излучения лунной поверхности на космической станции «Луна-10».—*Геохимия*, 1966, № 8, с. 891.
34. Зонды исследуют лунную трассу. М.: Машиностроение, 1964.
35. Исследования верхней атмосферы и космического пространства, выполненные в СССР в 1968 г.: Доклад КОСПАР-XII, Прага. М.: Наука, 1969. Разд. 1.
36. *Успехи СССР в исследовании космического пространства*. М.: Наука, 1968.
37. *Watkins H. D.* Ranger 9 Data promises basic insights of Lunar surface.—*Aviat. Week and Space Technol.*, 1965, Sept. 4, p. 16.
38. *Jaffe L. D.* Recent observations of the Moon by spacecrafts.—*Space Sci. Revs.*, 1969, 9, p. 561.
39. *Келдыш М. В.* Новый важный этап изучения Луны.—*Вестн. АН СССР*, 1965, № 9, с. 22.
40. *Jaffe L. D.* Depth of Lunar dust.—*J. Geophys. Res.*, 1965, 70, N 24, p. 6129.
41. *Jaffe L. D.* Lunar surface strength.—*Icarus*, 1967, 16, N 1, p. 75.
42. *Jaffe L. D.* Lunar overlay depth in Mare Tranquillitatis. Alphonsus and nearby highlands.—*Icarus*, 1966, 15, N 5, p. 51.
43. *Терцаги К.* Теория механики грунтов. М.: Стройиздат, 1961.
44. *Scott R. F.* Principles of Soil Mechanics. Reading: Addison Wesley, 1963.
45. *Jaffe L. D.* Strength of the Lunar dust.—*J. Geophys. Res.*, 1965, 70, N 24, p. 6139.
46. *Eggleston J. M., Patterson A. W.* Lunar rolling stones.—*Photogramm. Eng.*, 1967, N 3, p. 246.
47. *Сурков Ю. А.* Гамма-спектрометрия в космических исследованиях. М.: Атомиздат, 1977.
48. *Швидковская Т. Е., Лейкин Г. А., Кривошеина А. А., Краснопольский В. А.* О фотометрической функции Луны и микроструктуре лунной поверхности.—*Астрон. цирк.*, 1970, № 582, с. 5.
49. *Sky and Telescope*, 1967, Apr., p. 258.

К главе 3

50. *Березанцев В. Г.* Предельное равновесие связной среды под сферическим и коническим штампам.—*Изв. АН СССР. ОТН*, 1955, № 7, с. 70.
51. *Виноградов А. П., Сурков Ю. А., Флоренский К. П.* и др. Исследование лунной поверхности на советских автоматических станциях «Луна-9», «Луна-13».—В кн.: *Физика Луны и планет*. М.: Наука, 1972, с. 25.
52. Первые панорамы лунной поверхности. М.: Наука, 1966. Т. 1.
53. Первые панорамы лунной поверхности. М.: Наука, 1969. Т. 2.
54. *Черкасов И. И., Кемурджиан А. Л., Михайлов Л. Н.* и др. Определение плотности и механической прочности поверхностного слоя лунного грунта в месте посадки автоматической лунной станции «Луна-13».—*Космич. исслед.*, 1967, 5, вып. 5, с. 756.
55. *Черкасов И. И., Шварев В. В.* Начала грунтоведения Луны. М.: Наука, 1971.
56. *Стрелов Ю. Н., Акслер В. В., Дрюченко Д. Д.* и др. О влиянии свойств лунного грунта на характер отбора пробы (по материалам АЛС «Луна-20»).—*Космич. исслед.*, 1976, 14, вып. 1, с. 120.
57. *Carrier W., Mitchell J. K., Mahmood A.* The nature of Lunar soil.—*J. Soil Mech. and Found. Div.*, 1973, N SM-10, p. 26.
58. *Jaffe L. D.* Scientific results of the Surveyor-I Lunar landings.—In: *COSPAR: Moon and Planets*. Amsterdam: North Holland, 1968, vol. 2, p. 91.
59. *Scott R. F.* On meeting an old friend.—*Eng. and Sci. Mag.*, 1970, N 2, p. 4.
60. Surveyor V Mission Report. Pt 2. Mission: Description and Performance.—*Calif. Inst. Techn. JPL, NASA Techn. Rept*, 1968, N 32-1246, p. 35.
61. Surveyor VII Mission Report. Pt 2. Mission: Description and Performance.—*Calif. Inst. Techn. JPL, NASA Techn. Rept*, 1968, N SP-173.

62. Surveyor Project Final Report. Pt 2. Science Results.—Calif. Inst. Techn. JPL, NASA, Techn. Rept, 1968, N 32-1265.

К главе 4

63. Передвижная лаборатория на Луне «Луноход-1». М.: Наука, 1971.
64. Кемурджян А. Л., Громов В. В., Черкасов И. И., Шварев В. В. Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны. М.: Машиностроение, 1976.
65. Кемурджян А. Л., Громов В. В., Шварев В. В. Исследования физико-механических свойств внеземных грунтов.— В кн.: Успехи Советского Союза в исследовании космического пространства: Второе космическое десятилетие, 1967—1977. М.: Наука, 1978, с. 352.

К главе 5

66. NASA, SP-214. Apollo-11: Preliminary Sci. Rept, 1969.
67. NASA, SP-235. Apollo-12: Preliminary Sci. Rept, 1970.
68. NASA, SP-272. Apollo-14: Preliminary Sci. Rept, 1971.
69. NASA, SP-289. Apollo-15: Preliminary Sci. Rept, 1972.
70. NASA, SP-315. Apollo-16: Preliminary Sci. Rept, 1972.
71. NASA, SP-330. Apollo-17: Preliminary Sci. Rept, 1973.
72. Costes M. C., Carrier W. D. Apollo-11. Soil mechanics investigations.—Science, 1970, 167, N 3918.
73. Scott R. F. Apollo Program Soil Mechanics Experiment: Final Rept. NASA Contractor Rept 1975, CR-144438.
74. Гольдовский Д. Ю. Некоторые научные итоги полета «Аполлона-16».— Земля и Вселенная, 1973, № 1, с. 37.
75. Шевченко В. В. Оранжевый грунт.— Там же, 1973, № 6, с. 35.
76. Howland H. J., Mitchell J. K. Mechanics of Rolling Sphere-Soil Slope Interaction: Final Rept. Berkeley; Space-Sci. Lab. Univ. Calif., 1971. Vol. 2.

К главе 6

77. Виноградов А. П. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-16».— В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974, с. 7.
78. Сурков Ю. А., Рудницкий К. М., Глотов В. А. Приемка и изучение лунного грунта в среде инертного газа.— Там же, с. 29.
79. Стахеев Ю. И., Тарасов Л. С., Крестинина К. К., Иванов А. В. Бокс для работы с лунными образцами в атмосфере азота.— Там же, с. 34.
80. Флоренский К. П., Иванов А. В., Тарасов Л. С. и др. Морфология и типы частиц образца реголита из Моря Изобилия.— Там же, с. 38.
81. Стахеев Ю. И., Вульфсон Е. К., Иванов А. В., Флоренский К. П. Гранулометрические характеристики лунного грунта из Моря Изобилия.— Там же, с. 44.
82. Дружининская В. И., Маркачев В. В., Семенов А. В. и др. Предварительные результаты исследования механических свойств лунного реголита.— ДАН СССР, 1972, 199, № 7, с. 1274.
83. Леонович А. К., Громов В. В., Дмитриев А. Д. и др. Результаты исследований физико-механических свойств лунного грунта в исследовательском боксе в среде азота.— В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974, с. 561.
84. Веденин А. И., Духовской Е. А., Маркачев В. В. и др. Исследование механических свойств лунного грунта и его аналогов в различных атмосферных условиях и вакууме на установке TOP-1.— Там же, с. 571.
85. Дрожжина М. П., Дымов В. В., Крылов В. М. и др. Прибор TOP-1 для исследования инженерно-физических свойств лунного грунта.— ДАН СССР, 1971, 199, № 5, с. 1038.
86. Духовской Е. А., Мотовилов Э. А., Силин А. А. и др. Исследование фрикционных свойств лунного грунта и его аналогов.— В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974, с. 582.

87. *Леонович А. К., Громов В. В., Дмитриев А. Д.* и др. Основные особенности процессов разрушения и деформации лунного грунта.— В кн.: Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975, с. 585.
88. *Сурков Ю. А., Шандор В. В., Топоров Ю. П.* и др. Результаты исследований контактно-механических свойств лунного грунта.— Космич. исслед., 1975, 13, вып. 6, с. 923.
89. *Шандор В. В., Сурков Ю. А., Черкасов И. И.* и др. Влияние адсорбированных газов и воды на взаимодействие между зернами сыпучих грунтов.— Основания, фундаменты и мех. грунтов, 1974, № 5, с. 27.
90. *Jaffe L. D.* Shear strength of Lunar soil from Oceanus Procellarum.— Moon, 1973, 8, N 1/2, p. 58.

К главе 7

91. *Meltzer K. I.* Bodenmechanische Überlegungen im Zusammenhang mit der Geländegängigkeit von Modfahrzeugen.— Bauingenieur, 1971, 46, H. 6. S. 210.
92. *Гущенко И. И.* Пеплы северной Камчатки и условия их образования. М.: Наука, 1965.
93. *Влодавец В. И.* Вулканизм Камчатки и некоторых других районов СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
94. *Ибрагимов К.* Исследование структурно-механических свойств рыхлых и пористых вулканических пород и моделирующих их материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСИ, 1969.
95. *Малеев Е. Ф.* Вулканокластические горные породы. М.: Госгеолтехиздат, 1963.
96. Проблемы геологии Луны. М.: Наука, 1969. (Тр./ГИН; Вып. 204).
97. *Черкасов И. И.* Физико-механические свойства рыхлых вулканических горных пород.— В кн.: Тр. III Междунар. конф. по механике грунтов и фундаментам. М.: Стройиздат, 1968, с. 57.
98. *Черкасов И. И., Ибрагимов К., Зобачев Н. М.* и др. Деформации и разрушение структуры некоторых дисперсных грунтов и пористых материалов.— В кн.: Сб. тр. к VII Междунар. конф. по механике грунтов и фундаментам. М.: Стройиздат, 1969, с. 85.
99. *Черкасов И. И., Шварев В. В., Штейнберг Г. С.* Рыхлые вулканические отложения — возможные земные аналоги грунтов Луны.— Космич. исслед., 1969, 7, вып. 5, с. 760.
100. *Черкасов И. И., Шварев В. В., Штейнберг Г. С.* и др. Физические и механические свойства современных рыхлых отложений вулканов Камчатки и их сопоставление со свойствами грунтов Луны.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1970, № 11, с. 3.
101. *Штейнберг Г. С.* Сравнительная морфология кратеров и цирков Луны и некоторых вулканических образований Камчатки.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1965, № 10, с. 15.
102. *Ацагорцян З. А.* Природные каменные материалы Армении. М.: Стройиздат, 1967.
103. *Ацагорцян З. А., Мартиросян О.* Туфы и мраморы Армении. Ереван: Армгосиздат, 1962.
104. *Pellegrino A.* Proprieta fisico-meccanico dei terreni vulcanici dei Napoletano. Napoli: Ed. Sci. Ital., 1967.
105. *Бабков В. Ф., Смирнов А. С.* Определение прочности грунта для проезда колесных машин.— В кн.: Тр. Междунар. конф. по механике грунтов и фундаментам. М.: Стройиздат, 1963, с. 13.
106. *Черкасов И. И., Шевченко Г. И.* Механические параметры и консистенция: связанных грунтов.— В кн.: Строительная теплофизика. Минск: Энергия, 1966, с. 21.
107. *Черкасов И. И., Михеев В. В., Зобачев Н. М.* и др. Влияние плотности упаковки и объемного веса на механические свойства сыпучих грунтов.— Основания, фундаменты и мех. грунтов, 1969, № 6, с. 8.
108. *Черкасов И. И., Михеев В. В., Петрухин В. П.* и др. Влияние силы тяжести на механические свойства грунтов.— Там же, 1970, № 1, с. 14.

109. Черкасов И. И. Структурно-механические свойства хрупких пористых материалов.— В кн.: Строительная теплофизика. Минск: Ин-т тепло- и массообмена АН БССР, 1973, с. 56.
110. Черкасов И. И., Рогаткина Ж. Е., Ковалев Ю. И. Молотый базальт и вспученный перлитовый песок— новые материалы для испытательных стендов.— Тр. МИИТ, 1973, вып. 432, с. 26.

К главе 8

111. Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Иванов А. В. Роль экзогенных факторов в формировании лунной поверхности.— В кн.: Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1974, с. 439.
112. Иванов А. В., Родэ О. Л., Стахеев Ю. И., Флоренский К. П. Силикатные шарики в образце реголита, доставленном автоматической станцией «Луна-16».— В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974, с. 232.
113. Нусинов М. Д., Черняк Ю. Б. Лунные стеклянные шарики— откуда они?— Земля и Вселенная, 1976, № 1, с. 50.
114. Рухин Л. Б. Основы литологии: Ученые об осадочных породах. Л.: Недра, 1969, с. 522.
115. Шульц Л. В. Форма частиц и ее роль в формировании свойств песчаных пород.— В кн.: Реф. сб. ЦИНИС. 1973, сер. 11, вып. 6 (24), с. 27.
116. Brinch-Hansen J., Lundgen H. Hauptprobleme der Bodenmechanik. Berlin, 1960.
117. Нусинов М. Д., Смородинов М. И., Шварев В. В. Физическая модель грунта «морских» районов Луны.— Основания, фундаменты и мех. грунтов, 1975, № 5, с. 24.
118. Черкасов И. И., Козлова Н. Ф., Никитина В. И. Влияние примеси сферических зерен на механические свойства сыпучих грунтов.— Тр. МИИТ, 1977, вып. 560, с. 105.
119. Покровский Г. И., Федоров И. С. Центробежное моделирование в строительном деле. М.: Стройиздат, 1968.
120. Halajan J. D. Gravity effects on soil behaviour.— In: The Lunar Surface Layer. New York: Acad. Press, 1964, p. 67.
121. Stein B. A., Johnson P. C., Little A. D. Investigation of soil adhesion under high vacuum.— In: The Lunar Surface Layer. New York: Acad. Press, 1964, p. 93.
122. Sjaastad D. An experimental study in Lunar soil mechanics.— In: The Lunar Surface Layer. New York: Acad. Press, 1964, p. 23.

К главе 9

123. Winterkorn H. F., Johnson R. W. Consideration of properties of simulated Lunar soil with possible stabilization techniques.— In: The Lunar Surface Layer. New York: Acad. Press, 1964, p. 491.
124. Moon—the next construction site?—Eng. News Rec., 1969, July 24.
125. Гончарова Л. В. Основы искусственного улучшения грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1973.
126. Гегузин Н. К. Физика спекания. М.: Наука, 1967.
127. Barnes D. Marion. Aspects of Lunar sulphur technology.—Ann. N. Y. Acad. Sci., 1965, 123, N 2, p. 1082.
128. Черкасов И. И., Козлова Н. Ф. Новый метод термического укрепления грунтов.— Тр. МИИТ, 1977, вып. 560, с. 259.
129. Черкасов И. И., Рогаткина Ж. Е., Никитина В. И. Структурно-механические свойства вулканических песков современных отложений центральной Камчатки.— Там же, 1973, вып. 432, с. 19.

К приложению

1. Ксанфомалити Л. В. Планеты, открытые заново. М.: Наука, 1978.
2. Мюррей Б., Белтон М. Дж., Даниэльсон Дж. Э. и др. Телевизионные на-

- блюдения Меркурия с «Маринера-10». — В кн.: Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975, с. 697.
3. Кузьмин А. Д., Маров М. Я. Физика планеты Венера. М.: Наука, 1974.
 4. Алексеев В., Минчин С. Венера раскрывает тайны. М.: Машиностроение, 1975.
 5. Аудуевский В. С., Маров М. Я., Рождественский М. К. и др. Автоматические станции «Венера-9» и «Венера-10» — функционирование спускаемых аппаратов и измерение параметров атмосферы. — Космич. исслед., 1976, 14, вып. 5, с. 655.
 6. Колосов М. А., Яковлев О. И. Радиофизические исследования Венеры с космических аппаратов. — Земля и Вселенная, 1978, № 3, с. 33.
 7. Крупенин Н. Н. Исследование Луны и планет радиофизическими методами. — В кн.: Успехи Советского Союза в исследовании космического пространства: Второе космическое десятилетие, 1967—1977. М.: Наука, с. 381.
 8. Мороз В. И. О структуре марсианского грунта по оптическим и инфракрасным измерениям. — Космич. исслед., 1976, 14, с. 85.
 9. Новое о Марсе: Сб. статей/Пер. с англ.; Под ред. и с предисл. В. И. Мороза. М.: Мир, 1974.
 10. Сэган К. Марс с «Маринера-9». — Земля и Вселенная, 1973, № 5, с. 8.
 11. Голицын Г. С. Нижняя атмосфера Марса. — Там же, 1973, № 5, с. 17.
 12. Гольдовский Д. Ю. «Викинги» летят к Марсу. — Там же, 1976, № 3, с. 16.
 13. Ксанфомалити Л. В. О возможном механизме слипания частиц марсианского грунта. — Письма в Астрон. журн., 1977, 3, № 7, с. 326.
 14. Murray B., Burgess E. Flight to Mercury. New York: Columbia Univ. Press, 1977.
 15. Shorthill R. W., Hutton R. E., Moore H. J., Scott R. F. Martian properties experiment.—Icarus, 1971, Apr., p. 1
 16. Mars, as viewed by Mariner 9.—NASA, 1974, SP-329.
 17. Shorthill R. W., Hutton R. E., Moore H. J. et al., Physical properties of the Martian surface from Viking 1 lander.— Science, 1976, 193, p. 805.
 18. Mars, as Viking sees it.—Nat. Geogr. Mag., 1977, 151, p. 3.
 19. Gore R. Sifting for life in the Sands of Mars.—Nat. Geogr. Mag., 1977, 151, p. 9.
 20. Moore H. J., Hutton R. E., Scott R. F. et al. Surface materials of the Viking landing sites.—J. Geophys. Res., 1977, 82, p. 4997.
 21. Zimmer H., Moore H. J., Shorthill R. W., Hutton R. E. Grain size distribution of the Martian soil inside the Viking-2 footpad-3.—COSPAR-20. Plenar Meeting, 1977, p. 1.
 22. Masursky H. An overview of geological results from Mariner 9.—J. Geophys. Res., 1973, 78, N 20, p. 4009.
 23. Milton D. J. Water and process of degradation in the Martian landscape.— Ibid., p. 4037.
 24. Carr M. H. Volcanism on Mars.—Ibid., p. 4049.
 25. Cutts J. A., Smith R. S. U. Eolian deposits and dunes on Mars.— Ibid., p. 4139.
 26. Sagan C. Sand stormes and eolian erosion on Mars.— Ibid., p. 4155.
 27. Carr M. H., Shaber G. G. Martian perma frost features.— Ibid., p. 4039.
 28. Carr M. H., Greeley R., Blasices K. R. et al. Same Martian volcanic featur, as viewed from the Viking orbiters.—Ibid., p. 3985.
 29. Masursky H., Boyce J. M., Dial A. L. et al. Classification and time, of formation of Martian Channels based on Viking date.—Ibid., p. 4017.
 30. Carr M. H., Crumpler L. S., Cutts J. A. et al. Martian impact craters and emplacement of egecta by surface flow.—Ibid., p. 4055.
 31. Binder A. B., Arvidson R. E., Greiness E. A. et al. The geology of the Viking lander I Site.— Ibid., N 4439.
 32. Mutch T. A., Arvidson R. E., Binder A. B. et al. The geology of the Viking lander 2 Site.— Ibid., p. 4452.
 33. Toulmin P. III, Baird A. K., Clark B. C. et al. Geochemical and mineralogical interpretation of the Viking chemical results.—Ibid., p. 4625.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Предмет изучения, задачи и методы грунтоведения Луны	5
Глава 2. Исследование лунных грунтов косвенными методами	16
Глава 3. Исследования лунных грунтов с неподвижных автоматических станций	36
Глава 4. Исследования с помощью подвижных автоматических лабораторий «Луноход-1 и -2»	84
Глава 5. Исследования экспедиций «Аполлон»	97
Глава 6. Изучение физико-механических свойств лунных грунтов на Земле	119
Глава 7. Земные аналоги лунных грунтов	162
Глава 8. Лабораторные опыты с аналогами лунных грунтов	172
Глава 9. Проблемы технической мелиорации лунного реголита	198
Приложение. Современные представления о грунтах Меркурия, Венеры и Марса	205
Литература	226

Игорь Иванович Черкасов,
Валентин Владимирович Шварев

ГРУНТОВЕДЕНИЕ ЛУНЫ

Утверждено к печати

Ордена Ленина Институтом физики Земли им. О. Ю. Шмидта Академии наук СССР

Редактор Ю. И. Ефремов. Редактор издательства Н. Н. Лезнова
Художник А. Г. Кобрин. Художественный редактор Т. П. Поленова
Технический редактор Н. Н. Кокина. Корректор Т. В. Гурьева

ИБ № 16101

Сдано в набор 30.07.79. Подписано к печати 18.12.79
Т-17879. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1
Гарнитура литературная Печать высокая
Усл. печ. л. 14,5. Уч.-изд. л. 15,4. Тираж 1300 экз.
Тип. зак. 4668. Цена 1 р. 80 к.

Издательство «Наука», 117864, ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90
2-я типография издательства «Наука», 121009, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

ИСПРАВЛЕНИЯ И ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
139	Табл. 6.2	$\gamma \cdot 10^2$	$\gamma \cdot 10$
141	Рис. 6.15 (вертикальная ось)	10 20 30 40	1 2 3 4
166	Табл. 7.2 (третий столбец)	1,72	1,79
		1,79	1,36
		1,36	1,03
		0,87	1,02
		1,02	0,81
		0,81	0,46
194	17 сн.	9 Н/см ²	9 кН/см ²

Зак. 4668. И. К. Черкасов, В. В. Шварев