

52 22.6

2-48

И.И.ЧЕРКАСОВ

В.В.ШВАРЕВ

ГРУНТ ЛУНЫ

Еще несколько лет назад ученые, говоря о грунте Луны, ограничивались умозрительными заключениями. С развитием космонавтики наука получила экспериментальную базу для изучения поверхности естественного спутника Земли. В книге дается обзор развития представлений о лунном грунте за последние двадцать лет, излагаются способы исследования грунта непосредственно на Луне, даются сведения о наземных лабораториях и их научном оборудовании для изучения образцов грунта, доставленных с Луны.

Ч $\frac{20801-036}{054(02)-75}$ 22-75НП © Издательство «Наука», 1975 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Луна стала первым небесным телом, на которое опустились космические аппараты, высадились космонавты и провели свои первые рейсы автоматические и управляемые человеком машины. В будущем следует ожидать создания на Луне длительно действующих автоматических и обитаемых научных станций. Поверхностный слой Луны подвергся разнообразным исследованиям, а в ее недрах заложены первые буровые скважины. Грунт Луны стал объектом инженерной деятельности человека.

Предлагаемая научно-популярная книга рассматривает в основном механические свойства лунного грунта, которые определяют условия посадки и движения по Луне, обуславливают возможность и методы возведения на Луне различных сооружений, площадок, укрытий.

Авторы использовали весьма обширный материал советских и зарубежных исследований грунтов Луны и сумели в сжатой и достаточно образной форме представить основные методы и приборы, примененные для изучения грунта на самой Луне, отбора проб и доставки лунного грунта на Землю для определения его свойств в наземных лабораториях.

Широкое применение новых решений, основанных на достижениях космической механики, машиностроения, автоматике, телевидения и телемеханики, позволило создать приборы для изучения грунтов, весьма отличные от тех, которые применяются на Земле.

Следует отметить, что на основе тех же принципов могут быть разработаны новые приборы и методы для исследования земных грунтов, что позволит ускорить, удешевить и сделать более надежными инженерно-геологические работы на Земле, особенно в ее труднодоступных районах.

Книгу, рассчитанную в первую очередь на читателей, интересующихся вопросами исследований Луны и планет, можно реко-

пендовать более широкому кругу людей, проявляющих интерес к технике грунтов Земли и новым методам их изучения. Собранные в книге данные подводят итоги первому циклу предварительных исследований лунного грунта, закончившемуся доставкой на Землю образцов реголита советскими станциями «Луна-16 и -20», американскими экспедициями «Аполлон», а также рейсами советских луноходов.

Эти данные существенно дополняют сведения, ранее опубликованные в научно-популярной литературе, и придают книге большой интерес.

Академик А. П. Виноградов

ВВЕДЕНИЕ

В современной науке грунтами называют любые горные породы и почвы, залегающие преимущественно в пределах зоны выветривания и являющиеся объектом инженерно-строительной деятельности человека *. На Луне к таким объектам относят поверхностную толщу рыхлых отложений — лунный реголит и скальные массивы, выходящие на поверхность или лежащие на небольшой глубине.

Инженерная деятельность человека еще недавно была связана только с решением проблем посадки на Луну и движения по ее поверхности. Затем возникли проблемы бурения, а в ближайшем будущем встанут вопросы строительства научных станций и заглубленных сооружений для защиты людей и оборудования от метеоритов и радиации.

Глубина, на которую человек проникнет в недра Луны, будет на первых порах небольшой. Поэтому теперь основное внимание уделяется исследованию поверхностных слоев, вовлекаемых в работу при посадке и движении лунной техники и устройстве легких сооружений.

Конструкторы лунной техники нуждаются в комплексе данных, характеризующих грунт в его взаимодействии с посадочными органами и колесами транспортных средств, с опорами сооружений и подземными конструкциями, с рабочими органами буровых станков и строительных машин. В этот комплекс входят прежде всего физико-механические характеристики грунта: его твердость, сжимаемость и сопротивление сдвигу, а также плотность, минералогический и гранулометрический состав, от которого эти характеристики зависят.

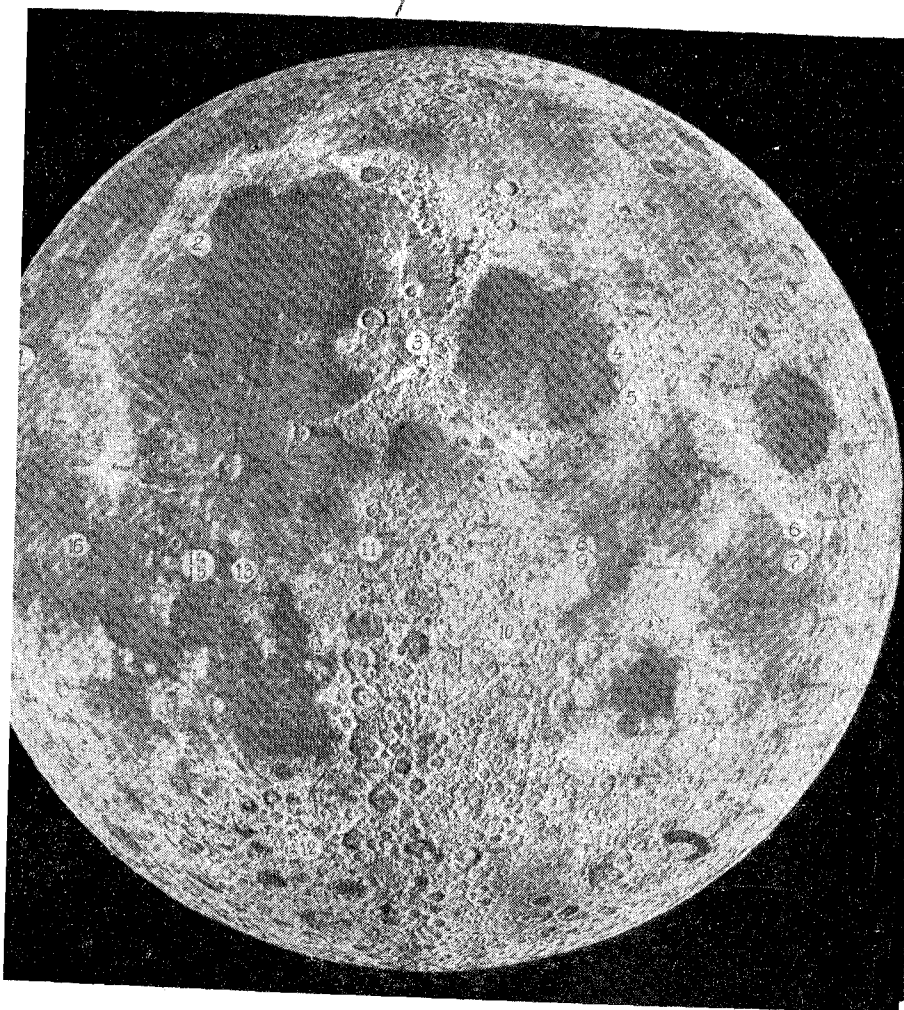
В прошлом оценка лунных грунтов давалась исключительно по астрономическим и радиофизическим данным и была весьма приближенной, а выдвигаемые разными учеными гипотезы резко расходились. После успешной посадки на Луну 3 февраля 1966 г. советской автоматической станции «Луна-9» положение коренным образом изменилось. В течение девяти лет, прошедших

* Большая советская энциклопедия, т. 7, с. 402.

после этой знаменательной даты, на Луну опустились 12 автоматических станций и 6 пилотируемых кораблей. Двигаясь по проложенным трассам, провели исследования грунтов два автоматических самоходных аппарата и совершили поездки три лунохода, управляемые космонавтами. В восьми различных районах Луны

Рис. 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»



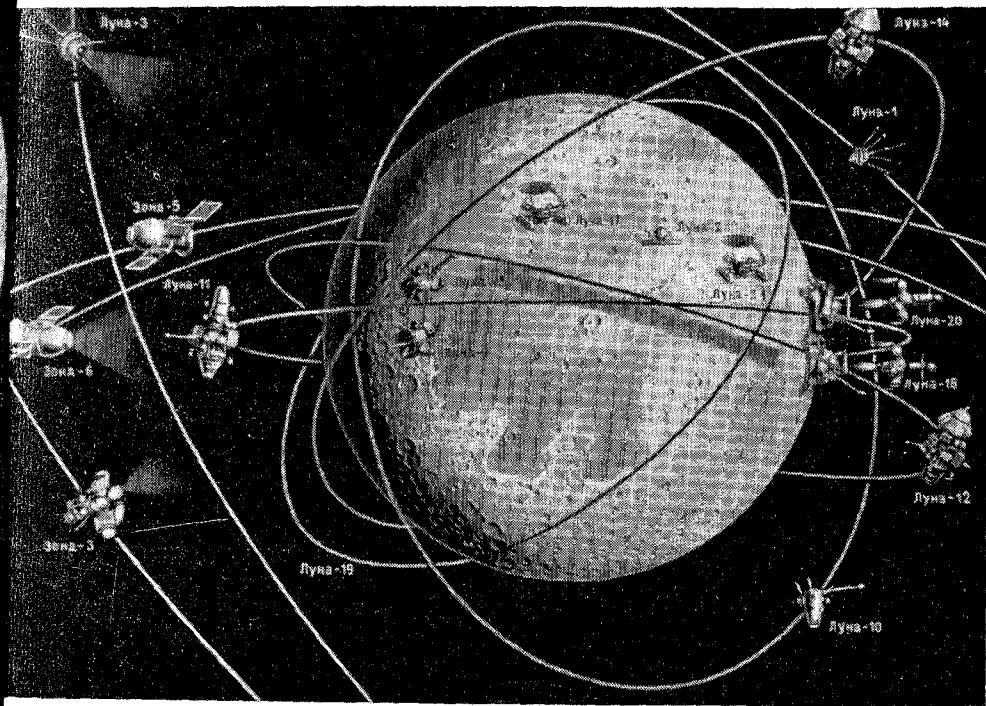
были собраны и затем доставлены на Землю образцы лунных грунтов. В пяти районах было осуществлено бурение разведочных скважин (рис. 1).

Роль пионеров в исследованиях Луны и окололунного пространства сыграли автоматические лунные станции, орбитальные аппараты (спутники Луны) и передвижные лаборатории — луноходы, запущенные в СССР. На рис. 2 представлены трассы полета и места работы советских автоматов, которые производили эти исследования.

Большой вклад в изучение лунных грунтов внесли американские автоматические станции «Сервейер» и лунные экспедиции «Аполлон». Эти экспедиции провели геологические исследования на Луне и доставили на Землю значительное количество лунного грунта из разных районов.

Можно считать более 20 различных параметров, характеризующих инженерно-физические свойства грунтов. Некоторая часть из них была определена непосредственно на поверхности Луны. Остальные данные получены при испытании проб лунных грунтов в наземных лабораториях. Однако эти исследования, проводивши-

Рис. 2. Схема трасс полета советских автоматических лунных станций и спутников



еся на малых дозах лунного вещества, далеко не достаточны для полного суждения о его свойствах. Исследование грунтов Луны находится все еще в первоначальной стадии и преследует пока цель определения главных показателей структуры и механических свойств, по которым можно было бы дать оценку и другим их свойствам.

Основными направлениями исследований грунтов Луны сейчас являются:

определение минералогического и гранулометрического состава грунта на Луне с помощью радиационно-химического анализа и анализа фототелевизионных изображений поверхности с последующим детальным исследованием проб лунных грунтов в земных лабораториях обычными методами;

определение плотности дисперсных грунтов и скальных пород, от которой в основном зависят их механические свойства;

определение сжимаемости и сопротивления сдвигу дисперсных грунтов прямыми и косвенными методами по внешнему виду поверхности грунта, деформированной посадочными органами или колесами лунных аппаратов, по следам космонавтов, отпечаткам различных приборов и устройств, доставленных на Луну; детальное определение этих же свойств на образцах, доставленных на Землю;

определение твердости горных пород, их абразивности и показателей трения при взаимодействии с материалами, находящимися в космической технике.

К этим основным направлениям исследований примыкают определения очень важных для ряда отраслей науки и техники тепловых, электрических, магнитных и радиационно-защитных свойств лунных грунтов. Но это уже выходит за рамки настоящей книги.

Работы по изучению грунтов Луны в общей программе космических исследований занимают скромное место. Однако, несмотря на это и в отличие от некоторых других экспериментов в космосе, опыты по изучению механических свойств лунных грунтов и их земных аналогов уже на первых этапах дали конкретные результаты, которые немедленно нашли практическое применение.

Получение первых экспериментальных данных о лунных грунтах позволило значительно усовершенствовать посадочные органы лунных станций и пилотируемых кораблей. Если при разработке системы посадки «Луны-9» небольшой спускаемый аппарат с массой 50 кг пришлось заключить внутри гигантского надувного мяча, который обеспечивал мягкое прилуние как на твердую поверхность скалы, так и на рыхлый дисперсный грунт, уже в 1970 г. автоматическая станция «Луна-16» с массой 80 кг совершила мягкую посадку на четыре небольших металлических диска, а самоходный аппарат «Луноход-1» с массой 6 кг отправился в свое первое путешествие на восьми колесах, опорная площадь которых составляла всего около 0,25 м².

Для изучения свойств грунтов Луны в условиях природного залегания, отбора их проб и доставки на Землю были созданы новые оригинальные научные приборы и механизмы и сооружены вакуум-камеры для испытания грунтов в условиях, приближающихся к лунным. Новые средства и методы исследования представляют значительную ценность также и для изучения земных грунтов. Это, в частности, относится к работам в труднодоступных или опасных для человека районах.

В силу исключительно больших трудностей проведения исследований на Луне и ограниченных запасов лунного грунта для земных исследований в лунном грунтоведении с самого начала его возникновения выделилась специфическая, присущая лишь ему отрасль — подбор земных аналогов лунных грунтов и всестороннее их изучение в условиях естественного залегания и в лабораторных условиях, имитирующих лунные. Поиски и исследования земных аналогов лунных грунтов привели к тому, что на Земле были найдены обширные естественные полигоны для испытаний лунной техники и созданы испытательные площадки и стенды для отработки взаимодействия лунных аппаратов с грунтами. Эти исследования позволили углубить знания о механических свойствах высокопористых тел и рыхлых дисперсных грунтов, в частности рыхлых вулканических отложений, а также о влиянии на дисперсные минеральные грунты температуры, гравитации, вакуума и атмосферы различных газов.

В настоящее время насчитываются уже сотни работ, посвященных грунтам Луны и методам их изучения. Они опубликованы главным образом в узкоспециальных журналах, малодоступных широкому кругу читателей. Задача настоящей книги состоит в том, чтобы сведения о методах исследования грунтов Луны и их земных аналогов и результаты этих исследований довести до всех, интересующихся проблемами космического естествознания, вопросами изучения и освоения Луны, а также инженеров и геологов, заинтересованных в применении новых приборов и средств исследования инженерно-физических свойств грунтов на Земле.

При написании книги были использованы отечественная и зарубежная литература по изучению грунтов Луны и результаты исследований, проводившихся с участием авторов.

Авторы выражают глубокую благодарность академикам А. П. Виноградову и А. Ю. Ишлинскому за обсуждение ряда вопросов, освещенных в тексте.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ЕСТЕСТВЕННОГО ЗАЛЕГАНИЯ ЛУННЫХ ГРУНТОВ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ И СТРОЕНИЯ ЛУНЫ

Наземные астрономические и радиофизические исследования Луны, полеты к ней космических аппаратов и, наконец, работы на поверхности Луны автоматических станций и научных экспедиций позволили получить обширные сведения о строении этого естественного спутника Земли. Установлены геометрические, динамические и физические параметры Луны. Получены многочисленные данные о рельефе и структуре лунной поверхности, о физико-химических свойствах лунного грунта, о физических условиях на поверхности Луны. Составлены подробные крупномасштабные карты Луны.

Однако по мере расширения наших сведений о Луне, которая благодаря развитию космической техники становится все более доступной эффективному исследованию, непрерывно возникают новые, часто совершенно неожиданные вопросы. Кроме того, многие данные, особенно те, которые связаны с ранней геологической эволюцией Луны или с процессами, протекающими в ее недрах, в ряде случаев совершенно различно интерпретируются. Это и не удивительно. Ведь наша планета Земля более доступна для изучения, накоплены многочисленные сведения о ее строении и свойствах, однако до сих пор продолжают споры о составе и структуре мантии Земли, расположенной под внешней ее оболочкой на глубине 30—50 км, и о природе плотного ядра Земли, не говоря уже о проблеме происхождения планеты.

Что касается Луны, то мы не знаем, как она возникла и как приобрела современный вид. Существует множество гипотез о происхождении Луны. Одна группа гипотез предполагает, что Луна отошла от Земли под действием приливов или других механических сил. Согласно другой группе, Луна и Земля образовались как двойная планета, аккумуляировавшись из единого газового облака. При этом допускается, что Луна могла сформироваться позднее из твердых тел, двигавшихся в окрестностях Земли. Наконец, существует третья группа гипотез, по которой Луна была захвачена Землей через некоторое время после того, как обе они полностью сформировались, при этом возможно, что несколько лун были захвачены Землей, а затем столкнулись и объединились в одну.

На основе имеющихся данных сейчас можно, хотя бы условно, предположить существование нескольких основных фаз развития Луны. Первая — это догеологическая стадия формирования, когда сразу после ее захвата Землей или окончания формирования из протопланетного облака Луна подвергалась интенсивной бомбардировке в течение короткого времени. Тела, которые падали в это время на Луну, были спутниками Земли и имели умеренные скорости. В результате сформировались поверхностные структуры ударного происхождения. Они предшествовали периоду образования самых ранних осадочных пород на Земле. Тепловая энергия ударов быстро рассеивалась и не прогревала Луну целиком. Однако каждая частица падающего вещества существенно нагревалась и теряла летучие компоненты, которые концентрировались на поверхности Луны. Подобный процесс на Земле привел к возникновению у нее начальной атмосферы и гидросферы, но сравнительно маленькая Луна быстро потеряла значительную часть летучих веществ.

Второй стадией развития Луны была магматическая, или вулканическая. Она началась после накопления радиоактивного тепла в недрах Луны и сопровождалась мощными базальтовыми излияниями, образовавшими обширные лавовые лунные моря. При этом выходила наиболее легкоплавкая фракция, которая, остывая, образовывала лунную кору. Первоначально, возможно, образовалась менее плотная кора, которая затем могла быть пробита не только вулканическими извержениями, но и метеоритными ударами. В результате происходило излияние магмы и образование более плотных пород.

Огромные равнины Луны едва ли являются застывшими потоками лавы из глубоких недр, они, вероятно, образовались за счет энергии соударений и за счет тепла, выделяемого радиоактивными элементами, сконцентрированными вблизи поверхностных слоев.

Наконец, третьей стадией развития Луны можно принять экзогенную. В этот период роль внутренней энергии, по-видимому, ослабла и основное значение приобрели внешние воздействия. Некоторые вулканы еще действовали. Но громадное число мелких кратеров, несомненно, имеет ударное происхождение. Интенсивно действовали на поверхности Луны и другие внешние факторы. Пыль, сплесшиеся агрегаты (брекчии) и обломки горных пород, формирующие верхний поверхностный слой Луны, образовались в этот период в результате тех же соударений и эрозии под действием света и частиц больших энергий.

Сравнительно-геологическое изучение Луны, несомненно, будет продолжаться на основе результатов комплексных исследований по различным направлениям. Основные из них — это геолого-морфологическое изучение поверхности Луны, изучение ее внутреннего строения геофизическими методами, определение физико-химических свойств и возраста лунных горных пород. При этом

одним из важнейших показателей, позволяющих вполне определенно судить о свойствах различных геологических образований, их изменении и влиянии на них различных геологических условий, могут быть механические характеристики лунного грунта. При этом, учитывая, что на поверхности Луны сохранились геологические образования и структуры, принадлежащие различным этапам и стадиям ее формирования, изучение механических свойств лунного грунта является одним из существенных элементов сравнительно-геологического анализа Луны.

ОСОБЕННОСТИ ЛУННЫХ УСЛОВИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА ГРУНТОВ

Размерам и массе Луны соответствует в шесть раз меньшее, по сравнению с земным, ускорение силы тяжести на ее поверхности, равное 162 см/с^2 . При таком ускорении силы тяжести сопротивление нагружению и устойчивость лунного грунта могут быть иными, чем у подобного ему грунта на Земле. Кроме того, меньшее ускорение силы тяжести снижает плотность упаковки частиц грунта, поскольку уменьшаются их вес и вес вышележащих слоев, а также несколько увеличивается пористость грунта. Таким образом, меньшее ускорение силы тяжести на Луне может обуславливать большую рыхлость и пористость лунных грунтов по сравнению с земными.

Важнейшим следствием меньшей, по сравнению с земной, силы тяжести на Луне является снижение так называемой критической скорости, или скорости убегания. Для Луны скорость убегания равна $2,5 \text{ км/с}$. Из-за относительно небольшого значения скорости убегания и существующего на поверхности Луны теплового режима Луна не имеет сколько-нибудь опутимой постоянной атмосферы. Из-за слабого поля тяготения и относительно высокой дневной температуры Луна не может удерживать на своей поверхности и воду. Следовательно, на Луне практически отсутствуют гидросфера и атмосфера — факторы, играющие важнейшую роль в формировании свойств земных грунтов.

В силу отсутствия атмосферы лунный грунт открыт воздействию ряда специфических факторов, которых нет на Земле. Главным из них является непрерывная бомбардировка поверхности метеоритами и микрометеоритами, представляющими собой частицы твердого космического вещества. Соударение метеоритов с лунным грунтом происходит при космических скоростях, тогда как в земной атмосфере большинство метеоритов тормозится до сравнительно небольших скоростей (только метеориты весом более тонны при падении на Землю могут сохранить свою скорость), а наиболее мелкие чаще всего испаряются в атмосфере.

Соударение метеоритов с Луной происходит со средними скоростями около $20-30 \text{ км/с}$ и сопровождается выделением огром-

ной кинетической энергии (превосходящей, например, в три 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 общему 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 объясняется тем, 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 плюс 125 днем до минус 175°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 значительное разрушение кристаллической структуры частиц грунта, 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, по мнению многих ученых, является одним из важнейших факторов лунной среды. По существующим представлениям, вакуум на поверхности Луны достигает 10^{-10} — 10^{-16} мм рт. столба. Он может быть причиной склонности мелко-раздробленных частиц лунного грунта к адгезии (слипанию) под действием межмолекулярных сил, возникающих при соприкосновении чистых поверхностей частиц. В условиях земной атмосферы адгезионный эффект сильно ослаблен из-за наличия различных

* Обычно твердые метеоритные частицы имеют плотность $3,6 \text{ г/см}^3$, хотя встречаются и весьма рыхлые частицы с плотностью до $0,25 \text{ г/см}^3$.

пленок, налипших на поверхности частиц. Отсутствие таких пленок может влиять на условия контакта и характер разрушения частиц грунта. Усиление адгезионных связей может стать причиной упрочения структуры грунта. В условиях вакуума и повышенных температур может происходить спекание мелких частиц грунта, оседающих после метеоритной бомбардировки с образованием при этом твердопористых структур.

Еще одним фактором, который может в какой-то мере влиять на механические свойства лунного грунта, является возможное накопление электростатических (положительных) зарядов на частицах лунного грунта, происходящее за счет электронной эмиссии лунной поверхности под действием ультрафиолетового, рентгеновского и солнечного корпускулярного излучений. В результате на Луне могут происходить электростатическое отталкивание и миграция пылевых частиц.

Таковы основные, известные из астрономических наблюдений особенности лунной среды, которые могут влиять на механические свойства лунного грунта.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА КОСВЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Первые сведения о лунной поверхности появились в результате визуальных наземных наблюдений и фотографирования Луны с Земли. Эти наблюдения не позволяли обнаружить детали размером менее 300—400 м, однако уже и эти сведения представляли интерес с точки зрения познания свойств лунных грунтов.

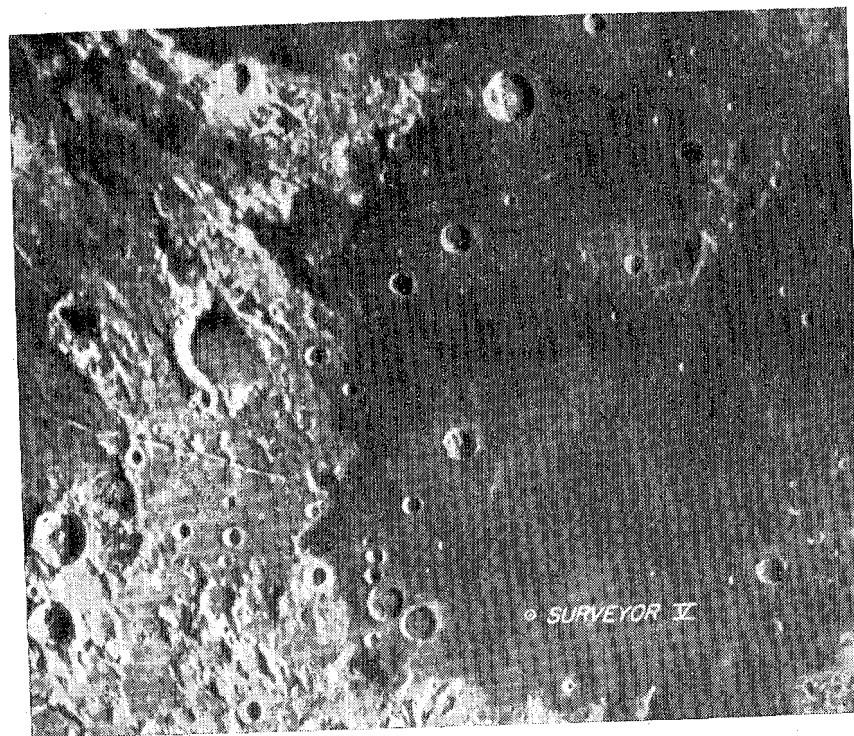
Поверхность Луны можно в целом разделить на два основных типа. Один тип характеризуется пересеченным рельефом и сравнительно светлой окраской (такая поверхность отражает местами до 20—30% солнечного света), другой — более ровным и плоским рельефом и более темным цветом (отражает в среднем лишь 7% света). Светлые области поверхности Луны условно названы материковыми, или горными, а темные — морскими.

Наиболее характерными элементами лунного рельефа являются кратеры. В материковых областях их в среднем примерно в 15 раз больше, чем в морских. Более мелкие кратеры имеют относительно свежий вид. Иногда кратеры довольно произвольно разделяют на множество типов (кратеры-лунки, просто кратеры, кратерные моря), хотя, по-видимому, существует только одна большая последовательность кратеров — по их размерам. Глубина кратеров мала в сравнении с их диаметрами, достигающими 80—200 км. Превышение вала над дном у крупных кратеров доходит до 6 км. Превышение гористых образований над окружающей поверхностью может быть до 8—9 км.

Типичный участок лунной поверхности с кратерами показан на рис. 3.

Вопрос о природе лунного рельефа весьма сложен и еще недостаточно изучен. Одни ученые считают, что рельеф Луны определили столкновения ее с метеоритными телами и астероидами. Другие полагают, что главную роль в формировании поверхности Луны играли процессы внутреннего характера, прежде всего вулканические. В наблюдаемых формах рельефа находят подтверждения и те и другие представления. По-видимому, наиболее приемлемой может быть гипотеза, которая связывает между собой ударные преобразования и вулканизм. Согласно этой гипотезе, на поверхности Луны существует целый спектр различных форм рельефа — от чисто метеоритного происхождения до чисто вулканических форм. При этом могут существовать промежуточные формы — метеоритные, измененные вулканизмом, и вулканические, подвергшиеся ударному преобразованию. Микроскопические следы ударов были обнаружены даже на мелких зернах лунного грунта (рис. 4). Не исключено, что в отдельных случаях мощное метеоритное воздействие непосредственно сопровождалось вулканизмом. Во всяком случае, разнообразие происхождения деталей лун-

Рис. 3. Типичный участок лунной поверхности — Море Спокойствия и прилегающий горный район Луны; кружком обозначено место посадки «Сервейера-5»



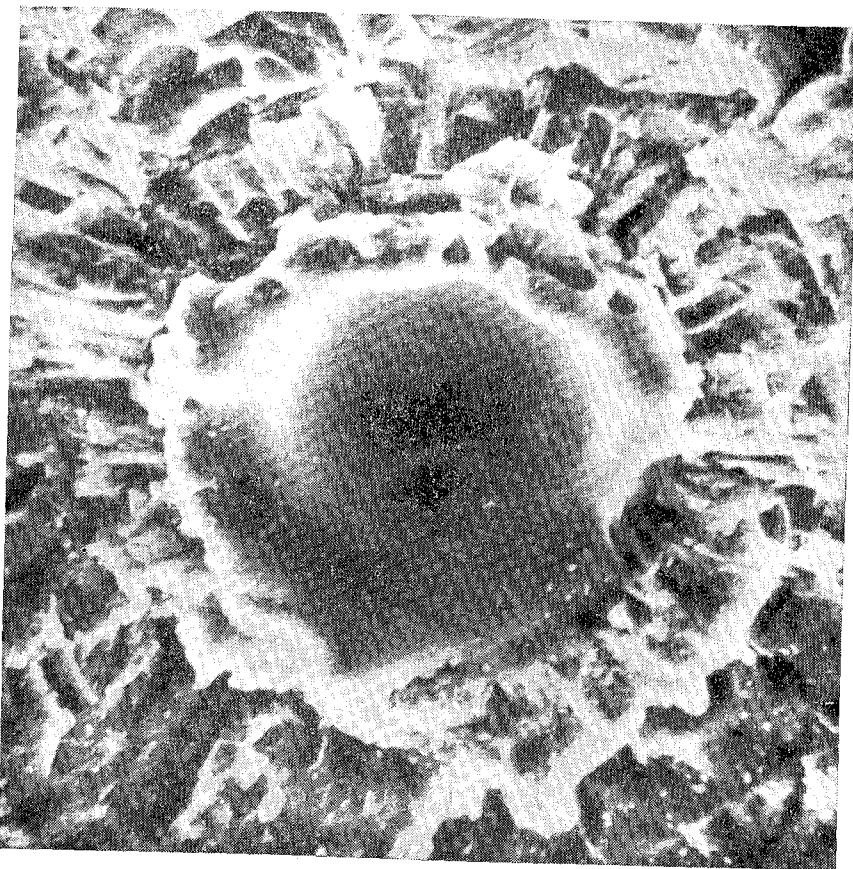
ной поверхности убеждает в существенной неоднородности свойств лунного грунта.

Первые представления о структуре и физических свойствах лунного грунта сложились на основе исследования оптических характеристик поверхности Луны, ее теплового и радиоизлучения, а также в результате радиолокации ее поверхности.

Оптические свойства поверхности Луны, характерные тем, что солнечный свет отражается ею преимущественно обратно, в сторону Солнца, указывают на то, что самый верхний слой грунта должен иметь весьма пористую структуру, напоминающую затвердевший пух или мох с тонкими и непрозрачными внутренними стенками.

Следует отметить, что фотометрические измерения показали примерно одинаковую степень шероховатости и пористости поверхности лунных материков и морей.

Рис. 4. Зерно лунного реголита со следом удара микрометеорита (увеличено)



На высокую пористость и изрытость верхнего слоя лунного грунта указывает также характер поляризации света, отражаемого лунной поверхностью, похожей по своей структуре на вулканический пепел. Форма кривой поляризации отраженного света в общем одинакова для морей и материков, но степень поляризации морских районов оказалась вдвое больше материковых. Это указывает на сходство, но не на полную однородность их наружного покрова.

Если о свойствах самого верхнего слоя лунного грунта мы узнаем путем оптических измерений в видимом свете, то первые сведения о слое грунта несколько большей глубины были получены на основе измерения инфракрасного излучения Луны. Эти измерения позволяют определять так называемый параметр тепловой инерции грунта, который зависит от теплопроводности, плотности и теплоемкости слоя грунта. Оказалось, что для верхнего слоя, глубиной до 1 см, параметр тепловой инерции можно принять равным 1000. Такое чрезвычайно высокое значение этого параметра в земных условиях может быть только у минеральных порошков в вакууме. Для нижележащего слоя грунта параметр тепловой инерции оказался значительно ниже. Он может быть принят таким, каким в земных условиях обладает песок и гравий (~ 100). На основе этих измерений был сделан вывод, что теплопроводность верхнего слоя лунного грунта намного меньше теплопроводности земных горных пород. Инфракрасные измерения, проведенные во время лунных затмений, выявили существенные различия в термических свойствах отдельных участков поверхности, что свидетельствует еще об одном возможном типе неоднородности грунта.

Оценка свойств более глубоких слоев лунного грунта впервые была сделана путем обработки результатов радиолокации Луны и регистрации ее радиоизлучения. Интенсивность радиоизлучения зависит от температуры излучающего слоя, параметра его тепловой инерции, а также от электрических свойств грунта. При этом чем больше длина используемой радиоволны, тем больше толщина поверхностного слоя, излучающего эту волну.

В результате радиофизических исследований, проведенных В. С. Троицким и его сотрудниками, был накоплен большой экспериментальный материал об излучении поверхностного слоя Луны толщиной от нескольких миллиметров до десятков метров. На основании этих данных, а также ряда теоретических и экспериментальных разработок был сделан вывод, что плотность верхнего слоя лунного грунта (в среднем на видимом полушарии Луны) толщиной до 3—4 см может быть принята равной $0,6 \text{ г/см}^3$. Затем плотность грунта растет, и в слое глубиной до 3—4 м она в среднем равна 1 г/см^3 . Далее идет переходный слой до глубины 6 м, плотность которого может быть равной $1,5\text{--}2 \text{ г/см}^3$. Еще глубже должны лежать скальные породы с плотностью $2,5\text{--}3 \text{ г/см}^3$.

В результате изучения радиоизлучения Луны было также установлено, что на глубине около 30 см колебания температуры составляют меньше одной трети ее колебаний на поверхности, а действие суточных тепловых волн запаздывает приблизительно на 80 час. На глубине около 1 м любые суточные колебания отсутствуют.

Следует отметить, что измерение радиоизлучения Луны в силу низкой разрешающей способности радиотелескопов позволяет в основном получить данные о свойствах грунта, усредненные по всему лунному диску, однако радиолокационные измерения дают возможность установить некоторые электромагнитные свойства грунта, а также рельеф поверхности на определенных участках площадью в несколько десятков квадратных километров.

Дальнейшие исследования поверхности Луны были продолжены путем ее фотографирования с космических аппаратов.

2 января 1959 г. в СССР был осуществлен запуск к Луне первого космического аппарата «Луна-1», который прошел на расстоянии 5—6 тыс. км от Луны. 4 сентября того же года аппарат «Луна-2» совершил облет Луны и сфотографировал ее обратную сторону. Затем станция «Зонд-3» продолжила фотографирование обратной стороны Луны. Оказалось, что обратная сторона Луны в общем похожа на видимую, но на ней мало морских районов и большая часть поверхности является материком, усеянным кратерами.

Следующим этапом исследования Луны было фотографирование ее поверхности с американских аппаратов «Рейнджер-7, -8 и -9» (1964—1965), специально предназначенных для детального исследования отдельных участков Луны. С помощью этих аппаратов передача телевизионных изображений продолжалась вплоть до их удара о поверхность при минимальной высоте фотографирования 300 м.

На снимках, полученных аппаратами «Рейнджер», можно было различить детали поверхности Луны размерами до 0,5—1,0 м. Анализ снимков позволил получить новые данные о деталях рельефа, которые предполагалось использовать для определения характера грунта, что было весьма важно для готовящейся мягкой посадки на Луну.

Однако единодушия в оценке полученных результатов достигнуто не было, и представления о лунном грунте продолжали оставаться противоречивыми. Так, Койпер пришел к выводу, что поверхность лунных морей представляет собой твердую пузырчатую лаву мощностью свыше 10 м с плотностью 0,1—0,3 г/см³ и прочностью 1—5 кг/см². Поверхность лавы эродирована космическими частицами, в результате чего в вакууме образовался верхний слой хрупкого материала. Уиткер, Моор и другие также считали, что поверхность Луны сложена лавой, возможно прикрытой слоем мелкораздробленного материала. Шумейкер полагал, что сфотографированные участки покрыты слоем мелких осколков и пыли

толщиной от одного миллиметра до десятков метров. При этом размеры частиц увеличиваются с глубиной (от доли миллиметра до нескольких сантиметров). Юри нашел на снимках подтверждение вулканической лунной деятельности. Голд рассматривал детали, обнаруженные на снимках, как подтверждение его теории пылевого верхнего покрова Луны.

При анализе снимков было отмечено, что лунные кратеры имеют глубину примерно в три раза меньшую, чем равные им по диаметру земные взрывные воронки. Изучение геометрии кратеров в полевых и лабораторных условиях и их сравнение с кратерами, видимыми на снимках, показали, что на поверхности Луны грунт должен быть рыхлым. Так, Джаффе на основании такого сравнения пришел к выводу, что поверхность Луны покрыта слоем гранулированного материала толщиной не менее 5 м, с минимальным пределом прочности, равным 10 Г/см².

Дальнейшее фотографирование поверхности Луны с разрешением примерно на порядок большим, чем это делалось с Земли, было проведено с пяти американских орбитальных аппаратов «Лунар Орбитер». В результате был получен обширный материал, полезный для морфологических исследований и картографирования Луны, но новых сведений о механических свойствах лунного грунта снимки «Лунар Орбитер» практически не дали. Были сделаны попытки оценить прочность грунта путем анализа видимых на некоторых снимках следов камней, выброшенных из кратеров и раскатившихся по поверхности. Прочность грунта по этим оценкам предлагалось принять равной 0,5 кг/см². В интерпретации снимков, полученных аппаратами «Лунар Орбитер», также не было согласия. По заявлению Голда, снимки с космических аппаратов представляют собой «магическое зеркало», в котором каждый ученый видит отражение своей собственной теории о происхождении Луны и физических свойствах ее поверхностного покрова.

На основании приведенного здесь обзора можно признать, что фотографирование поверхности Луны с советских и американских космических аппаратов позволило получить много новых сведений о рельефе поверхности Луны, но не смогло снять противоречий с представлениями о механических свойствах лунного грунта.

ЭВОЛЮЦИЯ ВЗГЛЯДОВ НА ПРОИСХОЖДЕНИЕ И СТРОЕНИЕ ЛУННОГО ГРУНТА

Еще задолго до прямых исследований на Луне возникли следующие основные гипотезы о происхождении и строении лунного грунта.

Гипотеза пылевого грунта. По этой гипотезе, предложенной Голдом, равнины лунных морей принимались за бассейны, заполненные пылью. Предполагалось, что толщина слоя пыли в них могла достигать многих километров. Основной причиной дробления лун-

ных 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.

Долгое время крайне низкая теплопроводность поверхностного слоя Луны рассматривалась как довод в пользу пылевой гипотезы. Однако, как указывалось выше, В. С. Троицкий и его сотрудники получили весьма высокое значение параметра тепловой инерции, которое, по их мнению, соответствовало очень пористым, но твердым веществам.

Гипотеза рыхлого связанного грунта. Хашке и Ван Хорн, Уорреп, а затем Голд и другие, 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 прочно 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, оседая в местах их накопления, цементируются 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 Салисбери и Смолли, средняя толщина обломочного слоя в области лунных морей может равняться примерно 10 м, но, поскольку 95% выброшенной породы концентрируется у гребня кратера, междукратерное 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

камней, выброшенных из соседних кратеров, а также оседания пыли. В крупнообломочном слое наряду с очень большими глыбами (5—10 м) должны встречаться камни, щебень и пыль всех фракций. На внешней поверхности везде должен лежать слой рыхлого легкого пористого материала. Продолжающиеся все время удары крупных метеоритов постоянно деформируют уже сложившуюся поверхность. В результате крупнообломочные пласты переслаиваются пылевыми и разрез в целом приобретает сложное строение.

Гипотеза грунта из метеоритного материала. Некоторые ученые предполагали, что процессы дробления на поверхности Луны отсутствуют, но происходит постепенное накопление падающих на лунную поверхность метеоритов. При этом образуется сплошной покров метеоритного вещества, толщина которого может достигнуть 1 см за 10^9 лет.

Метеоритно-шлаковая гипотеза. Эта гипотеза была предложена и наиболее полно разработана Н. Н. Сытинской, которая использовала результаты сравнительных фотометрических исследований поверхности 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, поздреватое, 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, переработанной 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 окрашена ее намного разнообразней и светлей, чем у материала верхнего покрова Луны.

Чаще высказывались предположения о поздреватой 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 мало-мощного (30—100 мм) покрова пыли на твердом скалистом основании.

В настоящее время наиболее вероятным можно считать такое строение верхнего слоя поверхности Луны: в глубине расположены скальные породы, может быть лавы; выше лежит крупнообломочный и пылевой слой, образованный под действием крупных метеоритов; на поверхности находится мелкодисперсный слой, созданный позднее длительной обработкой мелкими метеоритами; частицы верхнего слоя могут быть связаны или даже сцементированы между собой.

Этот верхний переработанный слой грунта называли реголитом. Он возник и продолжает формироваться на протяжении длительного времени в результате воздействия чрезвычайно большого числа событий, возможно имеющих различную природу. Толщина и свойства реголита зависят от суммарного времени воздействия процессов, влияющих на состояние поверхности Луны.

Вновь образовавшиеся при излиянии лавы, или выпадении вулканического пепла, или выбросе крупных обломков из больших кратеров участки поверхности не имеют покрова из реголита. Однако процесс его формирования начинается сразу же после образования новой поверхности. В этом отношении реголит сходен с почвенным слоем Земли.

Там, где реголит сформировался на крупнообломочных выбросах, границу раздела следует искать по различию гранулометрического состава и признакам физических и химических изменений исходной горной породы.

Современное представление о лунном реголите подробнее изложено в последующих главах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТА

К числу основных физико-механических параметров грунта, от которых главным образом зависит его сопротивление действию внешних сил, относятся: объемный вес γ , Г/см³; модуль общей деформации E_0 , кГ/см²; коэффициент относительной сжимаемости a_0 , см²/кГ; угол внутреннего трения ϕ ; сцепление c , кГ/см².

Зная эти параметры, можно определить несущую способность грунта и его деформацию под нагрузкой, найти давление грунта на подземные сооружения и ограждающие конструкции, установить допустимую крутизну и высоту откосов насыпей и котлованов. Эти же параметры определяют взаимодействие колес с грунтом, глубину колеи и сопротивление движению транспортных средств. Поэтому установление величин и параметров γ , E_0 , ϕ , c и показателей их статистической изменчивости является первоочередной задачей инженерно-геологических исследований грунтов.

Астрономические и радиофизические методы и фотографирование поверхности Луны, давшие ряд ценных общих сведений о природе лунных грунтов, недостаточны для точной оценки их инже-

нерно-физических свойств. Для этого необходимы прямые исследования на поверхности Луны или на образцах, доставленных на Землю.

Методика таких исследований давно и детально разработана. Проведение их на Луне сопряжено с большими трудностями, связанными с особыми условиями лунного окружения. Поэтому известные методы требуют существенной модификации, а также дополнения новыми методами, рассчитанными на использование в лунных условиях и в особенности на применение автоматических устройств. То же относится к исследованию грунтов в условиях имитирующих лунные.

В зависимости от условий проведения опытов и имеющейся аппаратуры определение γ , E_0 , ϕ и c может базироваться на самых различных исходных данных, начиная от качественной визуальной оценки и кончая результатами точных измерений на специальных лабораторных установках.

Подробное описание обычных методов и приборов для исследования физико-механических свойств грунтов в земных условиях можно найти в руководствах по грунтоведению и механике грунтов. Здесь же мы кратко охарактеризуем методы, получившие наибольшее распространение в науке, так как в дальнейшем изложении придется неоднократно их упоминать.

Объемный вес γ представляет собой произведение плотности грунта ρ на ускорение силы тяжести a . В земных условиях значения γ , выраженные в Г/см³, и ρ в г/см³, совпадают. На поверхности Луны объемный вес грунта при одинаковой плотности в шесть раз меньше, чем на поверхности Земли.

Объемный вес γ находят путем насыщения грунта в мерный сосуд или вырезания проб грунта острым металлическим кольцом и взвешивания их. Объем образца обычно составляет 100—200 см³. При этом стремятся сохранить природную структуру связанного грунта. Сыпучие грунты исследуют в рыхлом состоянии и максимально плотном состоянии. Параллельно с определением объемного веса определяется влажность высушиванием в термостате. Этот метод требует отбора образца грунта в поле и последующего исследования в лаборатории. Существуют методы, не требующие отбора образцов; для определения плотности и объема используются явления поглощения или рассеивания гамма-квантов исследуемым грунтом. Оба эти процесса тесно связаны с плотностью и позволяют достаточно точно определить ρ и γ как на поверхности, так и в буровых скважинах (см. гл. 2).

Модуль общей деформации E_0 представляет собой коэффициент пропорциональности между сжимающим напряжением P кГ/см² и относительным сжатием грунта. Его определяют в полевых условиях вдавливанием штампа по кривой зависимости осадки штампа от приложенной к нему нагрузки. Штамп площадью 0,2—0,5 м² утаптывают на поверхности или в шурфе нужной глубины. В лабораторных условиях E_0 определяется чаще всего путем одноосного

ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ СЕРИИ «ЛУНА»

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

сжатия образца грунта объемом 100—200 см³, заключенного в цилиндрическое кольцо, которое не позволяет ему расширяться в стороны, или на приборах трехосного сжатия, где образец заключен в резиновую оболочку. Более надежен полевой метод, так как при отборе проб для лабораторных определений происходит нарушение структуры грунта, а при зарядке лабораторного прибора возникают различные неплотности, что обычно приводит к занижению модуля деформации грунта.

Коэффициент относительной сжимаемости a_0 обратно пропорционален модулю общей деформации E_0 и равен отношению приращения коэффициента пористости грунта Δe к приращению сжимающего Δp напряжения, деленному на выражение $(1 + e_0)$, где e_0 — исходный коэффициент пористости образца. Величина a_0 определяется в лаборатории на компрессионных приборах путем сжатия образца, заключенного в вертикальное стальное кольцо. Объем образца 100—200 см³.

Угол внутреннего трения φ и сцепление c кГ/см² определяются обычно на приборе одноосностного сдвига, в котором образец грунта объемом 100—200 см³, заключенный в цилиндрическую обойму, разрезанную по горизонтали, подвергается сжатию в вертикальном направлении, а затем сдвигу в плоскости разреза обоймы. Опыт повторяется при трех-четыре различных значениях вертикальной нагрузки, и по его результатам строят график зависимости предельного сопротивления сдвигу от вертикального сжимающего напряжения. Этот график выражается наклонной прямой, параметрами которой служат $\operatorname{tg} \varphi$ и c .

Более точные результаты дает лабораторное определение параметров сопротивления сдвигу φ и c на приборе трехосного сжатия — стабилометре. В СССР нашел широкое применение стабилометр типа М-2 системы проф. Е. И. Медкова. В полевых условиях применяют ребристые штампы, осуществляющие сдвиг грунта на поверхности или на заданной глубине.

В лунных условиях все эти методы требуют серьезной модификации.

В последующих главах рассказано о методах определения физико-механических свойств лунных грунтов, которые применялись на Луне, а также в земных лабораториях на установках, имитирующих лунные условия.

Перед советскими автоматическими лунными станциями (АЛС) в области изучения грунтов Луны был поставлен большой комплекс задач, число и сложность которых возрастали с каждым последующим запуском АЛС в сторону Луны. Выбор мест посадки АЛС и маршрутов движения луноходов производился так, чтобы получить данные о наиболее характерных районах Луны при максимально экономичном и эффективном использовании лунной техники. Автоматические станции «Луна-9, -13, -16, -17, -20 и -21» опускались как в типично морских, так и горных районах видимого полушария Луны и выполнили комплекс исследований по оценке и точному определению ряда свойств лунных грунтов, начиная от экспериментального доказательства возможности безопасной посадки на Луну, движения по ее поверхности и кончая отбором проб лунных грунтов и доставкой их для детальных исследований в земные лаборатории (табл. 1).

Советские автоматические лунные станции были первыми в решении следующих важнейших задач лунного грунтоведения:

- мягкая посадка в морском и горном районах Луны;
- получение первых панорам лунной поверхности, сфотографированных на Луне;

- инструментальное определение плотности и прочности грунта специальными приборами, доставленными для этой цели на Луну;
- определение химического состава горных пород Луны с искусственных спутников Луны;

- отбор и доставка на Землю автоматическими устройствами образцов лунного грунта;

- экспериментальное доказательство возможности движения по лунной поверхности в морских и горных районах самоходного аппарата, управляемого с Земли;

- исследование свойств грунта и его взаимодействия с колесами самоходных аппаратов при их движении по протяженным трассам.

Всего было осуществлено шесть мягких посадок советских АЛС на Луну; из них четыре в морских районах и две в горном. Три искусственных спутника Луны («Луна-10, -11 и -12») использовались для определения химического состава горных пород Луны по их излучению.

Таблица 1

Характеристика мест посадки и исследований грунтов автоматическими станциями «Луна»

АЛС и время ее работы на Луне	Район посадки	Исследование
«Луна-9» 3/II 1966— 6/II 1966	Океан Бурь. Плоская равнина морского типа	Опытная проверка возможности мягкой посадки на поверхность Луны, фототелевизионная съемка поверхности грунта
«Луна-13» 24/XII 1966— 31/XII 1966	То же	Фототелевизионная съемка поверхности грунта, определение плотности и прочности поверхностного слоя
«Луна-16» 20/IX 1970— 24/IX 1970	Море Изобилия. Плоская равнина морского типа	Отбор образцов грунта с глубины до 35 см и доставка их на Землю
«Луна-20» 21/II 1972— 25/II 1972	Материковый район у кратера Аполлоний С	То же
«Луна-17», «Луноход-1» 17/XI 1970— 4/X 1971	Море Дождей. Плоская равнина морского типа. Луноход прошел расстояние в 10,5 км	Опытная проверка возможности доставки на Луну и движение по ее поверхности самоходного аппарата, управляемого с Земли. Определение химического состава грунта и его механических свойств по трассе движения. Исследование взаимодействия грунта с двигателем аппарата, геоморфология и топография поверхности
«Луна-21», «Луноход-2» 16/I 1973— 4/VI 1973	Кратер Лемонье в восточной окраине Моря Ясности. Переходный район между морской равниной и материковым массивом гор Тавр. Луноход прошел 37 км	То же

Исследование физико-механических свойств грунтов Луны с помощью автоматических лунных станций выполнялось в СССР под руководством вице-президента АН СССР академика А. П. Виноградова. Большой вклад в эти работы внесли Ю. А. Сурков, К. П. Флоренский, А. К. Леонович, В. В. Громов, В. В. Михеев, М. И. Смородинов и другие советские специалисты. Ряд экспериментов проведен при участии авторов этой книги.

РАБОТА АЛС «ЛУНА-9, -10, -11 И -12»

Автоматическая станция «Луна-9» была доставлена к естественному спутнику Земли ракетой, имевшей двигательную установку и систему, которая ориентировала двигатель при коррекции траектории полета и торможении перед спуском. Спускаемый аппарат АЛС представлял собой шаровидный герметический контейнер. На нем были укреплены раскрывающиеся лепестковые и штырьевые антенны и зеркала, находившиеся перед посадкой в сложенном состоянии. Сложенные лепестки-антенны придавали АЛС яйцевидную форму с центром тяжести, расположенным выше к основанию, благодаря чему после отделения посадочных устройств АЛС принимала заданное положение — антеннами вверх (рис. 5).

Поскольку к моменту запуска «Луны-9» точных данных о лунных грунтах не было, считалось равновероятным, что спускаемый аппарат может удариться о твердую скальную поверхность или же погрузиться в мягкий слой дисперсного грунта. Однако гипотеза о существовании толстого несвязного рыхлого слоя пыли, в котором мог бы утонуть спускаемый аппарат, советскими учеными не рассматривалась.

Мягкая посадка в указанных условиях была обеспечена тем, что АЛС была заключена между двух непосредственно перед посадкой надуваемых сжатым газом эластичных мешков, которые образовали упругую шаровидную оболочку. При соприкосновении с поверхностью Луны эта пневматическая система смягчала удар о твердые скальные выступы и снижала контактное давление на грунт до очень малой величины, исключаяющей глубокий провал в дисперсный грунт.

После того как двигатель лунной ракеты заканчивал торможение на подлете к Луне, спускаемый аппарат с посадочной системой отделялся от ракеты и в виде гигантского мяча падал на поверхность. Совершив несколько прыжков и скатившись по склону, он останавливался, после чего устройство, соединяющее пневматические мешки между собой, размыкалось, мешки отбрасывались в стороны и АЛС садилась на грунт. Через 4 мин. срабатывал механизм открытия лепестков, и корпус АЛС, ее штырьевые антенны и зеркала приводились в рабочее состояние. На гладкой горизонтальной поверхности ось АЛС отклонялась при этом на 16° от вертикали. Этот наклон обеспечивал передачу изображения поверхности начиная с удаления около 85 см от станции.

В герметичном контейнере АЛС были установлены радиоаппаратура, электронные программно-временные устройства, приборы автоматики, научная и телеметрическая аппаратура, телевизионная система и химические источники питания. Телевизионная система передавала одну строку в секунду. Полная круговая панорама состояла из 6 тыс. строк и передавалась 100 мин. Глубина

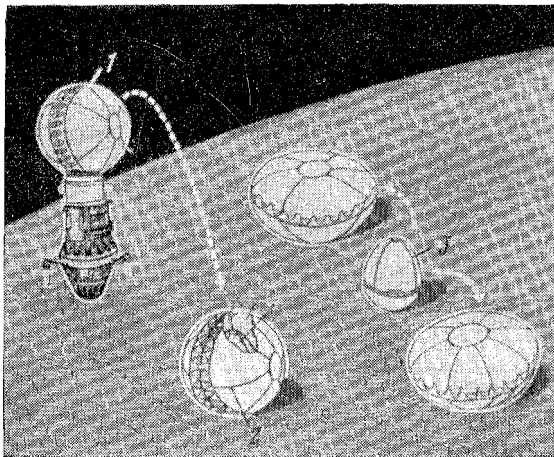


Рис. 5. Схема мягкой посадки АЛС «Луна-9»:

1 — торможение лунной ракеты и наполнение газом эластичных мешков посадочного устройства, 2 — автоматическая станция в посадочном устройстве на поверхности Луны, 3 — отделение эластичных мешков

резкости от 1,5 м до бесконечности. На расстоянии 1,5 м различались детали крупностью 1,5—2 мм. Три двугранных зеркала в поле зрения телекамеры позволяли использовать стереоэффект и определять расстояние до отдельных объектов, изображенных на панораме.

Передача лунных телепанорам проводилась 4, 5 и 6 февраля 1966 г. при высоте Солнца над горизонтом Луны 7, 13, 27 и 42°. В связи с неожиданным изменением положения АЛС между первым и вторым сеансами телекамера переместилась на 9 см, что позволило получить стереопары.

Первые панорамы, снятые «Луной-9», показали, что характерными деталями лунной поверхности являются округлые ямки небольших размеров, без вала или с едва намечающимися валами и камни или комки. Недостаточное разрешение затруднило суждение о гранулометрическом составе мелких фракций грунта, однако были получены достаточные данные о распределении камней и для определения их крупности. На плане изучавшегося участка Луны было нанесено 75 камней и комков крупностью более 2 см, расстояние до которых определялось стереоскопически. При прямом подсчете по панорамам число таких объектов удваивается и распределение их по размерам выражается следующими цифрами:

Крупность, см	2—5	5—10	10—15	15—20	20—25
Число камней	32	31	4	6	2

Некоторые из камней производят впечатление свободно лежащих, даже скатившихся в лунки, а другие более прочно связаны с поверхностью. Камни часто имеют неровный, изъеденный вид; видны раковистые углубления, которые могут быть следами ударов микрометеоритов или изломом пород стекловатого строения. Встречаются камни с четкими и остроугольными поверхностями осколков.

На панорамах, снятых «Луной-9», некоторые исследователи замечали наличие ряда линейных структур, которые в дальнейшем не были обнаружены.

Определение химического состава лунных пород с помощью искусственных спутников «Луна-10, -11 и -12» относится к числу крупнейших достижений советской космохимии.

31 марта 1966 г. в сторону Луны был запущен космический аппарат «Луна-10», на котором установлен специальный прибор — сцинтилляционный гамма-спектрометр для изучения спектрального состава гамма-излучения лунной поверхности в диапазоне энергий от 0,3 до 3,0 МэВ и ряд других научных приборов. 27 августа 1966 г. запущены «Луна-11» с аппаратурой для изучения гамма- и рентгеновского излучения Луны и 22 октября 1966 г. — «Луна-12», на которой продолжены исследования, начатые «Луной-10 и -11».

Собственное гамма-излучение Луны связано с присутствием в лунных горных породах естественных радиоактивных элементов — тория, урана, продуктов их распада и радиоизотопа калия K^{40} . Спектр естественного гамма-излучения характеризует химический состав горных пород. Располагая этим спектром, можно судить о том, какие минералы в них содержатся.

Помимо собственного гамма-излучения, имеется еще и наведенное излучение, которое возникает на поверхности Луны под действием космических лучей. В породах, содержащих мало естественных радиоактивных элементов и радиоизотопов, наведенное излучение может быть более интенсивным, чем собственное. Однако наведенное излучение характеризует химический состав горных пород, 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. Поэтому спектр наведенного излучения также может быть использован для суждения о химическом и минералогическом составе грунта.

Специальные лабораторные эксперименты с разными горными породами Земли позволили получить для них спектры гамма-излучения, которые затем легли в основу расшифровки результатов исследования гамма-излучения Луны.

Рентгеновское излучение Луны имеет, по-видимому, флуоресцентную природу и возникает под действием рентгеновского излучения Солнца. Атомы кремния, алюминия и магния, входящие в состав лунных горных пород, поглощают рентгеновское излучение

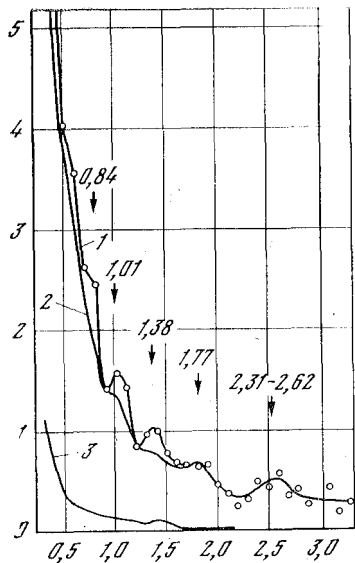


Рис. 6. Зависимость между энергией и интенсивностью излучения лунных пород, полученная «Луной-10»

по вертикали — скорость счета $\times 10^3$ имп/с, по горизонтали — энергия, МэВ

Солнца и переизлучают его в своих характеристических линиях с длинами волн 7, 8 и 10 А. Поток излучения от Луны в области длин волн от 8 до 14 А хорошо соотносится с величиной потока рентгеновского излучения Солнца. Спектр рентгеновского излучения может характеризовать состав горных пород, лежащих на дневной поверхности; спектр гамма-излучения — состав поверхностного слоя не толще 25 см.

Пролетая над поверхностью Луны, искусственные спутники «Луна-10», -11 и -12 регистрировали ее рентгеновское и гамма-излучение и передавали полученную информацию на Землю с привязкой ее к географическим координатам на Луне. Так были получены многочисленные спектры для морских и горных районов.

На рис. 6 представлены спектр, полученный «Луной-10» (кривая 1), спектр наведенного излучения (2) и спектр гамма-излучения естественных радиоактивных элементов, содержащихся в лунных породах (3). Как видно, 90% всего излучения обусловлено воздействием космических лучей.

Гамма-спектрометр «Луны-10» тарировался на различных земных породах: гранитах, базальтах и дунитах, а также на каменных метеоритах — хондритах. Сравнение спектров показало, что содержание радиоактивных элементов в лунных породах соответствует их содержанию в ультраосновных породах Земли. Пород с высоким содержанием радиоактивных элементов (гранитов кислого состава) на Луне не было обнаружено.

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

районами Луны собственное гамма-излучение отсутствует, как это и должно быть над породами ультраосновного типа.

В результате работы искусственного спутника Луны — «Луна-10» — впервые было установлено, что поверхность лунных морей состоит из базальтовых пород. Этот вывод был также подтвержден работами автоматических лунных станций «Луна-12» и «Сервейер-5 и -6», анализом образца лунного грунта, доставленного на Землю «Луной-16», и, наконец, анализами горных пород, доставленных из морских районов Луны экспедициями «Аполлон».

РАБОТА АЛС «ЛУНА-13»

Станция «Луна-13» стартовала 21 декабря 1966 г. На ней были установлены специальная аппаратура для исследования грунтов (грунтомер-пенетрометр, динамограф и радиационный плотномер), телевизионная система того же типа, что на «Луна-9», и другое научное оборудование. Часть аппаратуры располагалась внутри сферического герметичного контейнера вместе с радиооборудованием и системами терморегулирования, телеметрии, программным устройством и источниками питания. Снаружи на контейнере были размещены четыре лепестковые антенны, под которыми во время полета в сложенном виде находились штывевые антенны и механизмы выноса грунтомера-пенетрометра и радиационного плотномера, позволявшие установить эти приборы на расстоянии 1,5 м от АЛС (рис. 7).

После прилунения АЛС 24 декабря 1966 г. в Океане Бурь в 400 км от места посадки «Луны-9» и раскрытия лепестков приборы были установлены на поверхность грунта и приступили к работе. «Луна-13» действовала семь дней и передала на Землю три панорамы при высоте Солнца над лунным горизонтом в 6, 19 и 32°.

Фототелевизионная аппаратура «Луны-13» имела такую же разрешающую способность, как и «Луны-9». Но на ее панорамах уже видны признаки рыхлого зернистого слоя на поверхности. К ним относятся смутно различимый отпечаток одной из лепестковых антенн, который, вероятно, возник при раскрытии лепестков, а также след, оставленный на поверхности датчиком радиационного плотномера. Последний был укреплен на консоли выносного механизма. При установке на грунт он наносил мягкий удар, вызываемый падением с высоты 50 см, а в дальнейшем под влиянием смещений корпуса АЛС и температурных деформаций скользил по поверхности и оставлял на ней характерный след, выглаживая шероховатый природный микрорельеф.

На рис. 7 справа и слева от сферического корпуса АЛС видны звеньевые штанги выносных механизмов. На правой штанге укреплен радиационный плотномер. На левой штанге — грунтомер-пенетрометр, который не попал в кадр снимка. Датчик плотномера, имеющий продолговатую плоскую опорную плату, опущен на

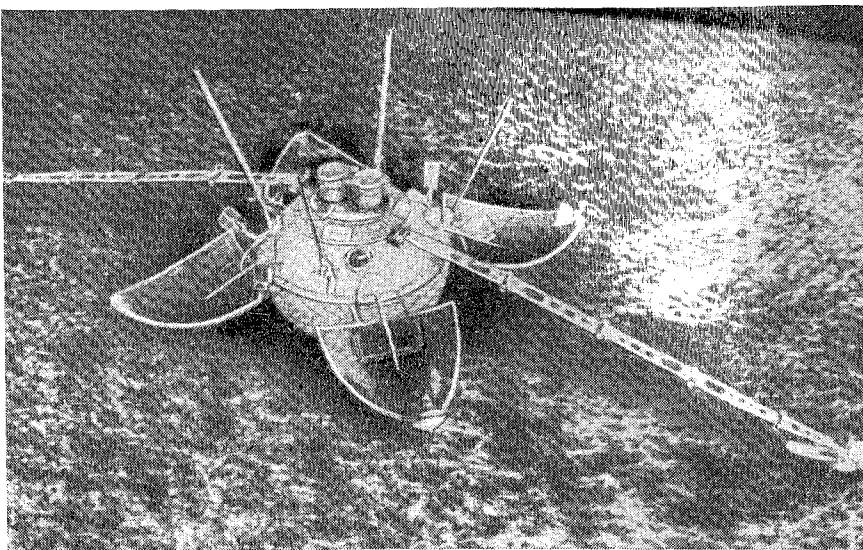


Рис. 7. Внешний вид автоматической лунной станции «Луна-13»

поверхность грунта. Он был сфотографирован телевизионной системой «Луны-13» крупным планом, причем оказалось, что прибор попал на сравнительно ровную поверхность, покрытую мелкими шероховатостями. Рядом с прибором была обнаружена гладкая поверхность, возникшая при первоначальном соприкосновении с грунтом, после которого прибор сместился на несколько миллиметров вперед и влево.

На крупномасштабном снимке была также видна четкая тень выносного механизма, прямолинейные контуры которой указывают на отсутствие больших камней и лунок.

След от первоначального соприкосновения подошвы датчика с грунтом имеет глубину в несколько миллиметров. Поверхность льда гладкая. Небольшая шероховатость и мелкие комочки, видимые рядом, были сняты датчиком, что говорит об их малой прочности. На снимке нет признаков глубокого пылевого слоя и льдов запыления самого датчика.

Распределение камней на фотопанорамах «Луны-13» получилось следующее:

Крупность, см	1—3	3—5	5—10	10—15	15—20
Число камней на площади 14,31 м ²	118	46	14	2	1

Кроме камней на снимках «Луны-13» можно усмотреть комоватые непрочные структуры, преобладающая крупность которых была оценена в 1—2 см.

Результаты работы грунтомера-пенетрометра

Грунтомер-пенетрометр, установленный на автоматической лунной станции «Луна-13», предназначен для оценки механической прочности лунного грунта и представляет собой первый научный прибор, примененный с этой целью при изучении Луны. Он состоит из пластмассового корпуса, нижняя часть которого образует кольцевой штамп с наружным диаметром 12 см и внутренним — 7,15 см. Верхняя цилиндрическая часть корпуса служит направляющей для титанового индентора — конуса, внедряющегося в грунт. Угол заострения конуса 103°, максимальный диаметр 35 мм, высота 13 мм. Индентор может выдвигаться вниз на глубину до 5 см (рис. 8).

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

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

Цилиндрическая часть индентора имеет выступ, перемещающийся в вертикальной прорези корпуса прибора и связанный с движком потенциометр, который измеряет величину смещения индентора относительно корпуса прибора. При работе на рыхлых пылевидных грунтах индентор может погрузиться глубже, чем на 5 см. При этом он захватывает своим выступом корпус прибора и вдавливают в грунт его кольцевой штамп. Погружение штампа может быть приближенно оценено по фототелевизионным снимкам.

Оценка механических свойств грунта прибором производится после того, как он выносится на поверхность с помощью особого пятизвенного выносного механизма. Команда на запуск двигателя прибора подается после того, как раскрылись лепестковые антенны станции, сработал выносной механизм и снят нулевой отчет с потенциометра.

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

Размеры конуса пенетрометра и рабочее усилие двигателя были выбраны так, что конус заметно погружается в большинство рых-

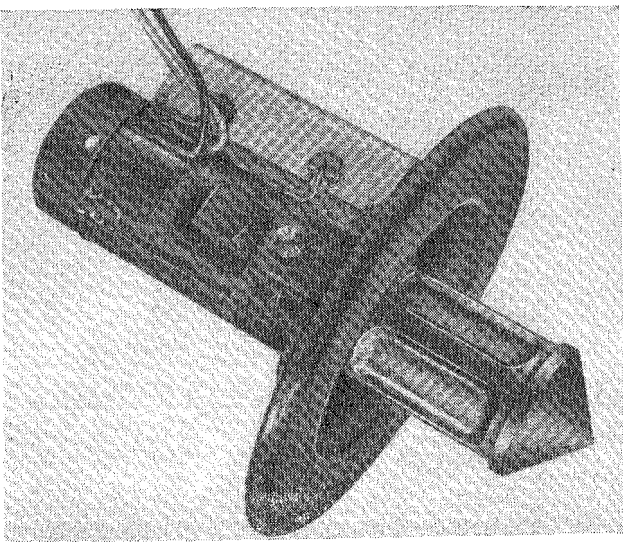


Рис. 8. Грунтомер-пенетрометр «Луны-13». Индентор в выдвинутом положении

рых и пористых твердых пород, которые могут быть встречены на поверхности Луны, за исключением очень прочных лав. Погружение цилиндрической части прибора возможно при наличии зернистых грунтов, а кольцевой штамп может быть вдавлен только в поверхность самых слабых несвязных зернистых грунтов и рыхлых пылевидных материалов.

Грунтомер-пенетрометр был впервые применен для исследования грунтов лунной поверхности 24 декабря 1966 г. в 21 час 06 мин. по московскому времени, после мягкой посадки АЛС «Луна-13». Первоначальная глубина погружения оказалась равной 4,5 см. В дальнейшем она менялась в пределах от 4,17 до 4,33 мм, то-видимому, вследствие температурных деформаций выносного механизма и корпуса станции.

При выдвижении индентора на 4,5 см, т. е. менее чем на 5 см, его выступ не мог увлечь за собой корпус прибора, и, следовательно, кольцевой штамп в грунт под действием силы тяги индентора не погружался.

Расшифровка результатов работы прибора была сделана двумя путями. Первый состоял в том, что в лабораторных условиях на Земле производились испытания прибора с установкой его на различных грунтах и материалах, свойства и плотность которых определялись параллельно общепринятыми методами.

Для наземной тарировки прибора было использовано 14 различных материалов, в число которых входили пористая базаль-

товая и андезит-базальтовая лава, пенобетон и пеностекло, кварцевый песок, гранитная дресва, керамзитовый гравий и аглопоритовый песок, вспученный перлитовый песок и др. Объемный вес у материалов колебался от 1,95 до 0,16 Г/см³, а агрегатное состояние — от твердого до рыхлого пылевидного. Тарировочные испытания велись на больших блоках твердых материалов и в цилиндрических баках глубиной и диаметром 60 см, засыпанных зернистыми и пылевидными материалами. Вдавливание индентора осуществлялось силой тяги двигателя прибора, а для контроля — статической нагрузкой.

В результате тарировки была получена таблица глубин погружения индентора и корпуса прибора в каждый из исследованных материалов, использованная впоследствии для расшифровки данных, полученных с Луны.

В дополнение к этим опытам, проведенным в обычных земных условиях, была проведена серия опытов в вакуум-камере с разрежением $(3-5) \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., которые показали, что сила тяги двигателя в этом случае увеличивается примерно на 8,5% и составляет в среднем 6,5 кГ. Специальные опыты были поставлены для выяснения влияния ускорения силы тяжести на глубину вдавливания индентора в зернистые грунты. Опыты проводились в кабине самолета, летящего по траектории, на которой выдерживалось ускорение, равное лунному ускорению силы тяжести, т. е. 1,62 м/с². Индентор вдавливался в два разных зернистых грунта с помощью спиральной пружины, глубина вдавливания регистрировалась механическим самописцем. Сравнение глубины погружения в этих условиях с глубиной погружения, полученной тем же способом на Земле, позволило установить, что понижение ускорения силы тяжести в шесть раз против земного привело в среднем к увеличению погружения индентора прибора на 70%.

С учетом повышения силы тяги в вакууме и увеличения погружения при лунном ускорении силы тяжести глубина погружения индентора в тот же грунт в земных условиях должна была составить около 2,6 см. В соответствии с тарировочными испытаниями это могло произойти в двух случаях: при работе прибора на сыпучем кварцевом песке с объемным весом более 1,52 Г/см³ или на легком пористом зернистом материале, обладающем слабым сцеплением между зернами, типа керамзита или аглопоритового песка с объемным весом около 0,77 Г/см³. Поскольку присутствие на поверхности Луны в самом верхнем слое материалов с объемным весом свыше 1,5 Г/см³ считалось маловероятным, было решено считать более достоверным существование слоя слабосвязного легкого зернистого материала, толщина которого под грунтомер-пенетрометром составляет не менее 5 см.

Приведенные данные относятся к случаю работы прибора на ровной поверхности. Поскольку на поверхности Луны встречается много камней и лунок, возможно искажение результатов измерения за счет перекоса прибора и образования под ним больших за-

зоров. Анализ с использованием данных о микрорельефе лунной поверхности показал, что вероятность полной браковки результатов опыта на рельефе, снятом станцией «Луна 9», составляет около 30%. В месте посадки «Луны-13» поверхность была несколько ровнее и вероятность получения достоверных результатов выше.

Таблица 2

Сцепление, угол внутреннего трения и объемный вес лунного грунта в условиях эксперимента АЛС «Луна-13»

φ, град	Сцепление с, кг/см ²	
	γ = 0,00133 кг/см ³	γ = 0,00250 кг/см ³
30	0,0119	0,0118
32	0,0091	0,0090
36	0,0045	0,0043

По результатам одиночного эксперимента с грунтомером-пенетрометром нельзя одновременно получить угол внутреннего трения, сцепление и объемный вес грунта. Две из этих величин необходимо измерить независимым методом, после чего можно вычислить третью.

Такие вычисления с использованием формулы В. Г. Березинцева были проделаны для трех значений φ = 30, 32, 38° и двух значений γ = 0,00133 кг/см³ и γ = 0,00250 кг/см³ (табл. 2).

Принимая среднее значение φ = 32° (такое же, как у аглопоритового песка, который был принят в качестве аналога), получили, что с ≈ 0,009 кг/см². Влияние объемного веса на величину с незначительно, что объясняется малым радиусом штампа.

Результаты работы динамографа

Внутри корпуса АЛС «Луна-13» была жестко укреплена система акселерометров, которая измеряла и передавала на Землю ускорение, возникавшее при соударении АЛС с поверхностью Луны. Эти ускорения зависят от жесткости поверхности и достигают максимума при ударе по скале. Динамограф был протарирован в земных условиях путем сброса спускаемого аппарата на материалы различной жесткости — от поролонового мата до плотного среднезернистого песка. Сравнение данных, переданных с Луны, с результатами тарировочных опытов показали, что наилучшее совпадение получается при соударении с кварцевым песком средней плотности с объемным весом γ = 1,52 г/см³.

Первое прямое определение плотности поверхностного слоя грунта Луны было выполнено радиометрическим методом путем измерения интенсивности рассеянного гамма-излучения. Этот метод основан на том, что к поверхности грунта прикладывается источник гамма-излучения, а на некотором расстоянии от него располагаются гамма-счетчики, защищенные от прямого облучения свинцовым экраном. Гамма-кванты, попадающие в грунт, взаимодействуют с веществом грунта, возникает фотоэффект и образуются пары электрон-позитрон и комптон-эффект. Фотоэффект и образование пары в процессе поглощения ведут к полному исчезновению гамма-квантов. Комптоновский же эффект является процессом рассеяния гамма-квантов на электронах среды, в ходе которого происходит частичная потеря энергии и изменяется направление движения гамма-квантов, часть из них, однако, возвращается к поверхности и попадает на счетчик.

Для гамма-метода измерения плотности оптимальный диапазон энергии квантов равен 0,5—3,0 МэВ. В этом диапазоне основным процессом взаимодействия гамма-излучения с веществом является комптон-эффект, сечение которого пропорционально Z/A, где Z — атомный номер и A — атомный вес элемента. Отношение Z/A примерно одинаково для всех элементов, содержащихся в минеральных грунтах (за исключением водорода), и равно 0,5—0,4. Следовательно, влияние химического состава на измерение невелико.

При проведении измерений плотности методом рассеянного гамма-излучения пользуются функциональной связью между регистрируемой интенсивностью гамма-излучения и плотностью среды N = f(ρ). Эта зависимость имеет максимум. Ее график можно разделить на три части: восходящую ветвь, область максимума и нисходящую ветвь. При этом положение максимума зависит от базы прибора (расстояния между серединой счетчика и источником), энергии источника и конструкции самого радиометрического прибора.

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

Основное преимущество описанного метода состоит в том, что аппаратура располагается на поверхности грунта и отпадает не-

обходимость бурения скважин. Это имеет особое значение для максимального облегчения и миниатюризации приборов. Недостаток заключается в том, что каждому значению измеренной интенсивности рассеянного излучения соответствуют два значения плотности исследуемой среды по восходящей и нисходящей ветвям кривой, выбор между которыми приходится делать, привлекая дополнительные данные.

Радиационный плотномер станции «Луна-13» состоял из блока датчиков и регистрирующего блока. Блок датчиков размещался на механизме, который после прилунения и раскрытия лестниц АЛС обеспечивал его вынос на расстояние 1,5 м от станции и главное прикладывание к поверхности грунта. Регистрирующий блок размещался в герметичном корпусе АЛС и соединялся с блоком датчиков тремя кабелями.

В блоке датчиков имелись источник гамма-излучения (радиоактивный изотоп цезия Cs^{137} активностью, эквивалентной 1 мкюри), разделительный свинцовый экран и три группы малоабаритных гамма-счетчиков СБМ—10М по пять штук в каждой группе. Расстояния от центра каждой группы до источника излучения были разными, и прибор работал при трех различных длинах базы. Корпус блока датчиков имел размеры $258 \times 48 \times 10$ мм и был снабжен двумя боковыми сегментами для облегчения его ориентации на поверхности грунта.

Блок регистрации состоял из трех одинаковых каналов (в соответствии с тремя группами счетчиков). В качестве регистрирующих элементов в каналах были использованы триггеры на транзисторах, соединенные последовательно. Индикация числа импульсов в разрядах каналов осуществлялась с помощью сумматоров, также выполненных на транзисторах. Выходным сигналом сумматора была величина напряжения, которая изменялась скачкообразно в соответствии с опрокидыванием триггеров, принимая восемь значений — от 0 до 6 В.

Общее число зарегистрированных импульсов в канале определялось путем поочередного измерения напряжений на выходе сумматоров. Ступенчатое изменение напряжения с выходов каждого канала электронного регистрирующего блока записывалось на пленку телеметрии и обрабатывалось при помощи специальных таблиц.

Таблицы и кривые для окончательной расшифровки показаний прибора были составлены на основании наземной тарировки его в средах различной плотности, к числу которых относились тяжелый бетон, легкие бетоны, керамзит, пеностекло и др. Тарировка велась в диапазоне изменения плотности $\rho = 0,16—2,6$ г/см³. В процессе тарировки производилось исследование энергетического спектра регистрируемого рассеянного излучения.

Особое внимание уделялось изучению влияния шероховатостей поверхности исследуемого материала на показания прибора. Зазоры между подошвой блока датчиков и поверхностью грунта раз-

лично влияют на регистрируемую интенсивность гамма-излучения на средах различной плотности. Так, для плотных сред, находящихся на нисходящей ветви зависимости, практически во всех случаях наличия каверн или неплотного прилегания датчиков происходит увеличение регистрируемой интегральной скорости счета. При проведении измерений на средах очень малой плотности (до $\rho = 0,4$ г/см³) плотность прилегания вызывает уменьшение скорости счета для всех баз радиационного плотмера; для других сред вблизи подошвы прибора имеются точки инверсии, которые помогают исключить влияние контактных условий измерений.

Для изучения влияния неровностей на показания плотмера были проведены эксперименты на среде плотностью $\rho = 0,75$ г/см³ с ровной поверхностью, буграми и кавернами под подошвой датчика. Оказалось, что каверны диаметром 3—4 см и глубиной 2—2,5 см меняют скорость счета на 5—10%, а бугры высотой 2—2,5 см — на 14—20%. При этом у группы счетчиков с малой базой происходит занижение, а у группы с большой базой — завышение скорости счета. Поскольку прибор имел три группы счетчиков с различными базами, влияние неровностей на осредненный результат измерений значительно ослаблялось. В связи с этим расшифровка результатов эксперимента, проведенного на Луне, производилась по тарировочному графику, приведенному к средней базе. График был построен с учетом фона внешнего облучения на поверхности Луны. Кривая на графике имеет синусоидальную форму с максимумом при $\rho = 1,5$ г/см³. Поэтому каждой скорости счета соответствуют два возможных значения плотности: $\rho_{\text{мин}} < 1,5$ и $\rho_{\text{макс}} > 1,5$ г/см³.

Интенсивность рассеянного излучения, зарегистрированного во время первого сеанса связи 24 декабря 1966 г., составила 0,96 условных единиц. Каждая условная единица соответствует средней сумме импульсов, зарегистрированных прибором при работе на материале плотностью 2,0 г/см³. На графике при интенсивности 0,96 имеются два значения плотности: $\rho_{\text{мин}} = 0,8$ и $\rho_{\text{макс}} = 2,1$ г/см³.

Поскольку присутствие плотных грунтов в самом верхнем слое лунных грунтов противоречило большинству астрономических, фотографических и радиофизических исследований, плотность в 0,8 г/см³ была признана более достоверной. Эта величина относится к слою толщиной около 15 см, на который распространяется зона действия радиационного плотмера.

Позднейшие определения плотности показали, что $\rho = 0,8$ г/см³ следует рассматривать как минимальное значение плотности верхнего слоя лунного реголита. Возможно, что датчик плотмера попал на точку с очень рыхлым грунтом, но не исключается возможность случайной ошибки измерений.

Таким образом, в результате работы АЛС «Луна-13» было сделано заключение, что в месте прилунения верхний слой грунта зернистый, слабосвязный, с толщиной слоя не менее 5 см, углом внутреннего трения около 32°, сцеплением примерно 0,009 кг/см³

плотностью $\rho=0,8$ г/см³ по радиационному плотномеру и $\rho=1,52$ г/см³ по динамографу. Гранулометрический состав установлен не был. Минералогический состав базальтовый общий для всех морских районов Луны. Статическая песущая способность на глубине 3,2 см равна 0,68 кг/см². Модуль общей деформации около $E_0=0,47$ кг/см².

ОТБОР И ДОСТАВКА НА ЗЕМЛЮ ОБРАЗЦОВ ЛУННЫХ ГРУНТОВ АЛС «ЛУНА-16 И -20»

Автоматические лунные станции «Луна-16» и «Луна-20» имели динаковое устройство и назначение. «Луна-16» осуществила мягкую посадку 20 сентября 1970 г. в районе Моря Изобилия, «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, закрепленной 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 укреплен, и приводов, перемещающих штангу в вертикальном и горизонтальном направлениях. Рабочим органом станка служил рубчатый виброударный бур с режущими наконечниками, рассчитанный на работу в широком диапазоне горных пород от несвязных пыле-песчаных до твердых скальных. Максимальная глубина бурения 35 см. Схема грунтозаборного устройства изображена на рис. 9.

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 ракеты Луна — Земля. Контейнер герметически закрывался.

По окончании этих операций ракета Луна — Земля стартовала Луны и направлялась к Земле. В конце полета спускаемый аппарат отделялся от ракеты и входил в атмосферу. После аэродинамического торможения раскрывался парашют и аппарат опускался в заданном районе, откуда подавал радиосигналы поисковой группе,

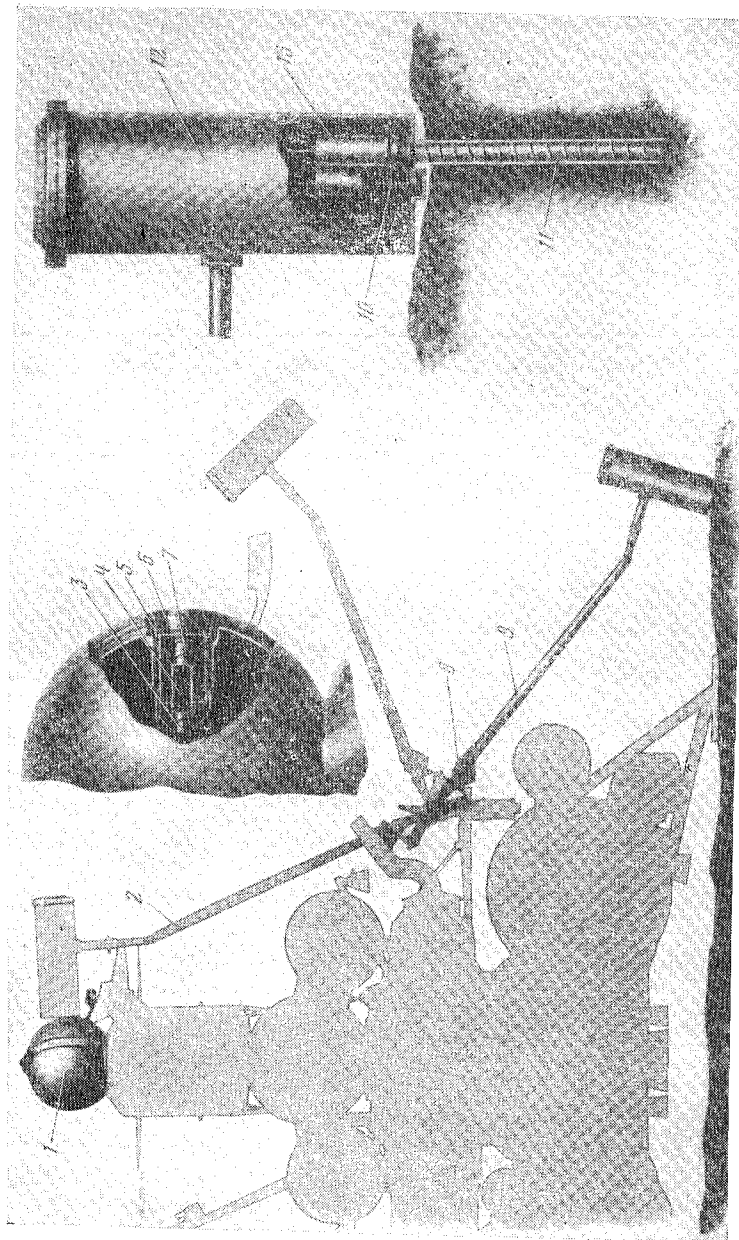


Рис. 9. Схема грунтозаборного устройства станции «Луна-20»:

1 — возвращаемый аппарат, 2 — исходное положение штанги и бурового станка, 3 — ампула возвращаемого аппарата, 4 — грунт, 5 — замок крышки, 6 — крышка герметизации ампулы, 7 — фиксирующая ампула, 8 — демпфер штанги, 9 — рабочее положение штанги и бурового станка, 10 — винт подачи, 11 — буровой снаряд, 12 — корпус бурового станка, 13 — вращатель

Бурение (прямой ход) при заборе грунта станцией «Луна-16» продолжалось 6 мин. 14 сек. на полную величину рабочего хода урового 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 2—3 кгсм.

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 Лупы.

Для доставки лунного грунта из труднодоступного горного района в феврале 1972 г. был осуществлен запуск автоматической станции «Луна-20». Станция была посажена в условиях лунного дня при высоте Солнца 46° над горизонтом, что позволило получить хорошие снимки панорамы лунной поверхности в точке посадки. Обзор местности, проведенный с помощью телефотометров, показал, что станция опустилась на сравнительно ровную и однородную поверхность, лишенную крупных отдельно 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 отклонена от вертикали на 17° .

Характер бурения при отборе грунта станцией «Луна-20» отличался от бурения станцией «Луна-16».

Буровой станок был включен для работы в 23 часа 14 мин. по московскому времени при температуре плюс 18°C на его корпусе и корпусе электродвигателя. После проходки скважины на 90 мм 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 150 мм. Здесь вновь произошло отключение приводных двигателей. После третьего включения двигателей бурового станка скважина была пройдена до глубины 340 мм.

Обратный ход станка проходил без осложнений и продолжался 9,8 сек.

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 сек., 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 часа 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 была зафиксирована нормальная работа всех механизмов станка. Следовательно, изменения скорости бурения и заклинивание происходили из-за особенностей взаимодействия бурового снаряда с лунным грунтом.

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

1-й этап — бурение на глубину от 0 до 90 мм. На этом этапе можно выделить два участка: первый (глубина проходки от 0 до 47 мм) характеризуется постоянной скоростью подачи, равной 82 мм/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 50 до 90 мм) характерен почти постоянной скоростью проходки, равной 60 мм/мин, и значительным увеличением последовательно возрастающего суммарного тока приводных двигателей вплоть до срабатывания токозащиты.

2-й этап — бурение на глубину от 90 до 150 мм. В целом этот этап, как и первый, может быть разбит на несколько основных участков.

Первый участок (от 90 до 115 мм) характерен значительной величиной скорости проходки (до 107 мм/мин) и сравнительно небольшой величиной суммарного тока. При дальнейшей проходке (от 115 до 150 мм), как и на первом этапе, наблюдалось уменьшение скорости от 107 мм/мин с таким же, как и на первом этапе, постепенным возрастанием суммарного тока вплоть до срабатывания токозащиты.

3-й этап — бурение на глубину от 150 до 340 мм. Этот этап также разбит на участки. Первый — отсутствие проходки в течение 8 сек., с одновременным резким возрастанием величины суммарного тока от 4 до 7,5 А. Второй (от 150 до 190 мм) — резкое увеличение скорости проходки до величины, превышающей паспортную скорость подачи вращателя бурового станка (240 мм/мин), с одновременным возрастанием суммарного тока от 7,5 до 8,8 А. Третий участок (от 190 до 280 мм) — снижение скорости проходки от 240 до 60 мм/мин. При этом суммарный ток приводных двигателей снизился до 5 А и оставался постоянным на всем этом участке. Четвертый участок (от 280 — до 300 мм) характеризуется резким увеличением скорости проходки до 120 мм/мин при постоянстве суммарного тока (5 А). Пятый участок (от 300 до 340 мм) — дальнейшее резкое увеличение скорости проходки до величины 228 мм/мин, превышающей паспортную скорость подачи бурового снаряда. Это увеличение скорости проходки сопровождалось резким возрастанием суммарного тока до срабатывания устройства защиты по току. На глубине 340 мм бурение было прекращено.

4-й этап — обратный ход, как уже отмечалось, был проведен за 8 сек., т. е. со средней скоростью 2040 мм/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 пуска бурового снаряда на 47 мм. Таким образом, общая глубина проникания бурового снаряда станции «Луна-20» в грунт составила около 300 мм. На всех этапах работы бурового станка наблюдались участки с превышением скорости подачи станка, по сравнению с минимальной паспортной скоростью, равной 1000 мм/мин.

Следует подчеркнуть, что увеличение глубины проходки на каждом этапе бурения сопровождалось последовательным резким возрастанием тока приводных двигателей вплоть до срабатывания устройства защиты по току. Соответственно изменялся и характер величины крутящего момента.

Как видно, бурение «Луны-20» было более трудным, чем бурение «Луны-16». Полного объяснения этому пока нет. Постоянство скорости бурения говорит как будто об однородности грунта, но отмеченные здесь особенности бурения противоречат этому. Общий вес образцы, доставленный «Луной-20» на Землю, составил 50 г, т. е. в два раза меньше, чем в предыдущем эксперименте. Исследование образцов проводилось в приемной лаборатории Академии наук СССР (см. гл. 5).

ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ПЕРЕДВИЖНЫМИ ЛАБОРАТОРИЯМИ «ЛУНОХОД-1» И «ЛУНОХОД-2»

17 ноября 1970 г. автоматическая станция «Луна-17» доставила на поверхность 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 Спокойствия, на поверхность Луны опущилась 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.

«Луноход-1» и «Луноход-2» по конструкции шасси и оборудования для изучения грунта мало отличались друг от друга.

Устройство «Лунохода-1»

«Луноход-1» представлял собой автоматический самодвижущийся аппарат, управляемый с Земли и позволяющий проводить исследование 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-1» позволило получить панорамы поверхности, на которых видны следы от колес машины, а также снимки отдельных участков поверхности с близкого расстояния. Об этих приборах и результатах, полученных с их применением, расскажем далее, а здесь приведем данные, характеризующие «Луноход-1» как своеобразный многоцелевой исследовательский аппарат для оценки физических и механических свойств лунного грунта по результатам его взаимодействия с самоходным шасси аппарата.

При конструировании «Лунохода-1» была поставлена задача обеспечить высокую проходимость аппарата по неровной поверхности, сложенной слабосвязным грунтом с малой несущей способностью и коэффициентом сопротивления движению $f = 0,25$, а также преодоление уклонов до 20° и 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 минус 170 до плюс 150°C , вакууме 10^{-14} мм рт. столба и воздействии космической радиации. Габаритные размеры машины, определяющие ее проходимость, указаны на рис. 10.

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. 11). 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 усло-

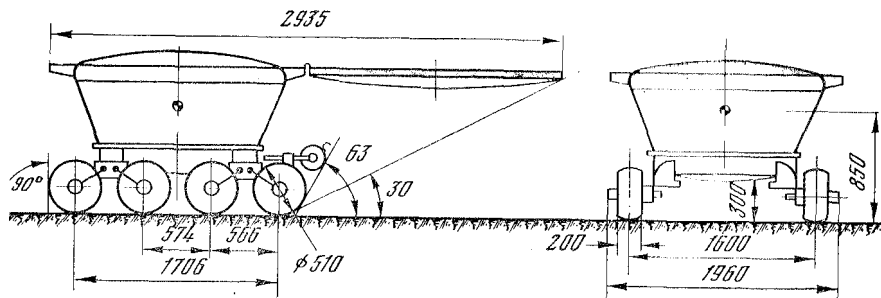


Рис. 10. Схема «Лунохода-1» (габариты в мм)

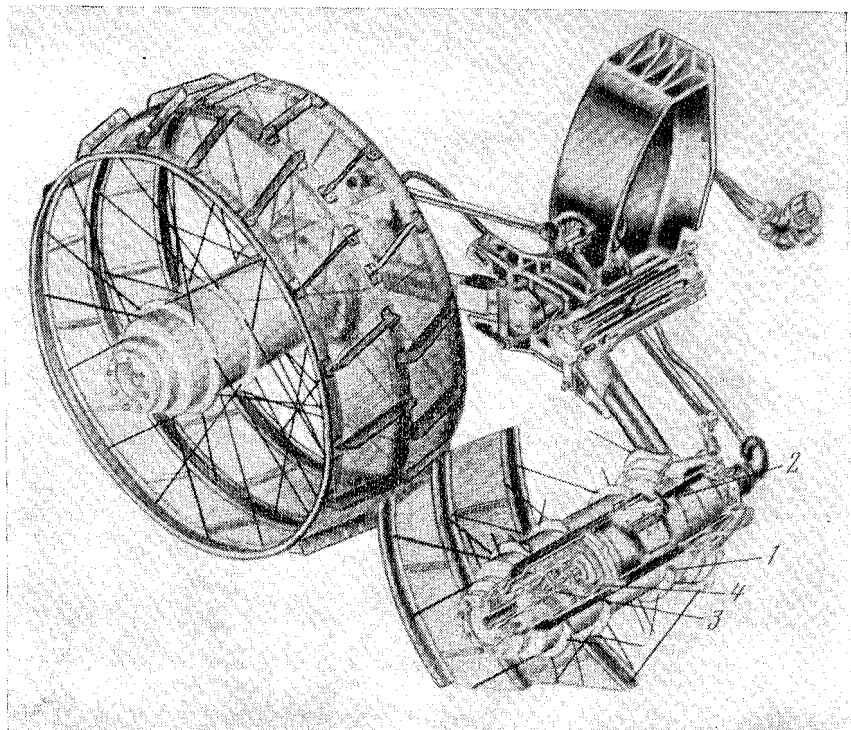


Рис. 11. Устройство колес «Лунохода-1»:

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

вий движения и принятия решения на основании просмотра телевизионных изображений пути, которые сменялись один раз в период от 3 до 20 сек. Скорость передачи изображений устанавливалась с Земли в зависимости от скорости передвижения и рельефа местности. Аппарат автоматически останавливался, если угол его наклона становился более 20° , а также при перегрузках электродвигателей. Для измерения пройденного пути служило свободно вращающееся девятое колесо.

Технические данные лунохода:

масса	756 кг
колесная формула	8×8
колесная база	1706 мм
ширина колеи	1600 мм
клиренс	300 мм
диаметр колес по грунтозацепам	510 мм
высота грунтозацепов	20 мм
ширина обода	200 мм

Преодолеваемые препятствия:

траншея шириной	600 мм
эскарп высотой	250 мм
контрэскарп глубиной	400 мм

Скорость движения:

первая	0,8 км/ч
вторая	2,0 км/ч

Радиус поворота борта с наибольшей скоростью:

в движении	3,5 м
на месте	0,8 м

Угол продольной статической устойчивости

45°

Угол поперечной статической устойчивости

45°

В ходе разработки «Лунохода-1» 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 скорости до 26° . На макетах лунохода, 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.

Исследование взаимодействия шасси с лунным грунтом

Во время движения «Лунохода-1» по поверхности Луны систематически измерялись пройденный путь, крен и дифференци 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 дифференци лунохода по длине пути был построен продольный профиль трассы и проведен статистический анализ распределения высот поверхности рельефа.

Для изучения процессов взаимодействия колес «Лунохода-1» 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 были получены данные о силе тяги, потребляемой энергии, мощности и скорости машины. Было установлено, что эти показатели зависят от продольного уклона трассы. Они позволили определить средние значения параметров движения в зависимости от выбранного распределения уклонов лунной поверхности (табл. 3).

Были получены также характеристики взаимодействия шасси с грунтом.

Анализ данных о движении машины показал, что коэффициент проскальзывания колес на горизонтальных участках трассы колебался от 0 до 15%, что может быть связано с неровностями поверхности и неоднородностью грунта на трассе. На склонах

Таблица 3
Параметры движения «Лунохода-1»

Условия движения	Сила тяги, кг	Скорость, км/ч	Мощность, Вт
по горизонтальной поверхности	24,1	0,993	175
в среднем по трассе	32	0,95	206

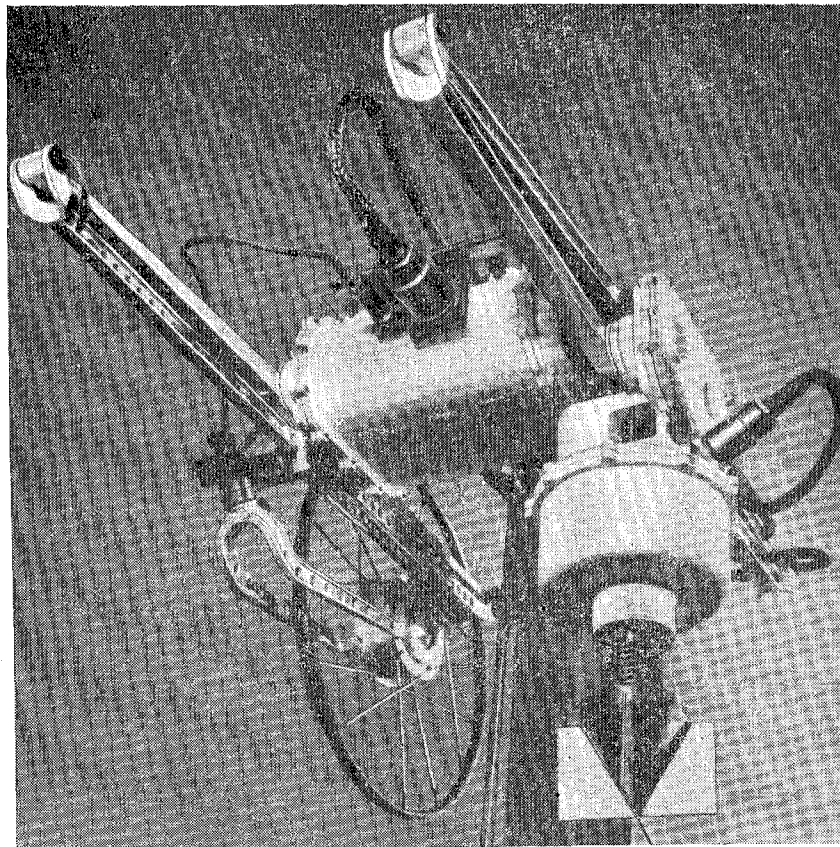
кратеров этот коэффициент увеличивался до 20—30%. Относительное сопротивление движению изменялось от 15 до 25%, а удельная свободная тяга — от 20 до 41% от собственного веса машины на Луне.

Определение механических свойств грунта

Основным прибором для определения механических свойств грунта на «Луноходе-1» 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 7,0 см, высота 4,4 см.

Механизмы прибора размещались в верхней и нижней головках. Верхняя головка укреплена неподвижно на корпусе лунохода, нижняя соединена с ней шарнирным параллелограммом, с помощью которого она может опускаться и подниматься. Рабочий орган может вращаться вокруг своей вертикальной оси (рис. 12).

Рис. 12. Общий вид прибора оценки проходимости (ПРОП)



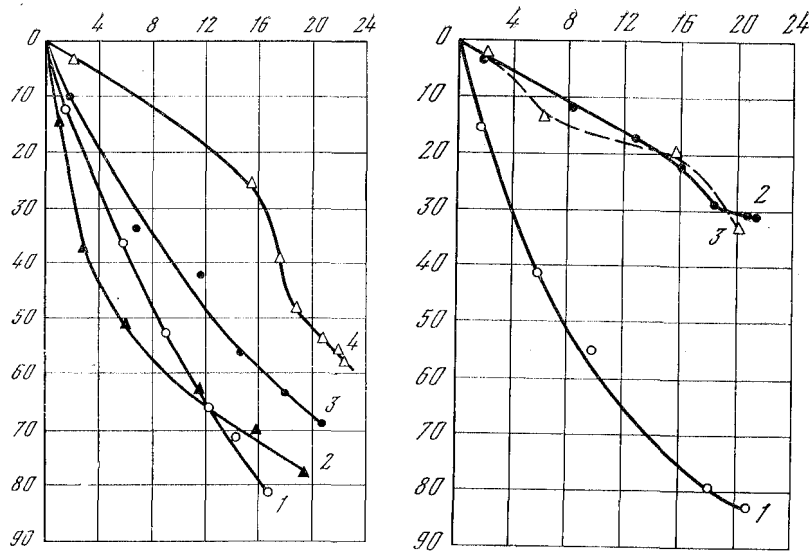


рис. 13. Зависимость между вертикальной нагрузкой и глубиной вдавливания конусно-лопастного штампа:

горизонталь — нагрузка в кГ, по вертикали — глубина вдавливания в мм; 1 — горизонтальном участке, 2 — на склоне кратера, 3 — на кольцевых валах кратера, 4 — на поверхности, усыянной мелкими камнями

рис. 14. Кривые вдавливания конусно-лопастного штампа при повторном погружении грунта:

горизонталь — нагрузка в кГ, по вертикали — глубина вдавливания в мм; 1, 3 — номера нагружений по порядку

Прибор оснащался 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 20 кГ. По достижении этого максимума или предельной глубины вдавливания 5 см конус с лопастями начинал повертываться вокруг своей вертикальной оси, причем происходил срез грунта по боковой поверхности цилиндра $D=7,7$ см и его основанию. Высота цилиндра равна глубине вдавливания штампа. Максимальный крутящий момент равен 0,5 кГм. Наибольший угол поворота 90° .

Несущая способность грунта определяется по формуле

$$R = 4P/\pi d^2 \text{ кГ/см}^2.$$

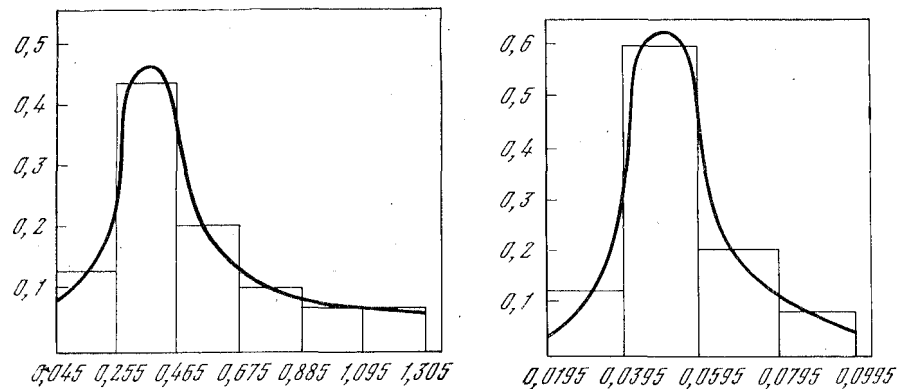


рис. 15. Гистограмма и кривая статистического распределения несущей способности грунта на одном из участков трассы «Лунохода-1»:

по горизонтали — несущая способность в кГ/см², по вертикали — частота распределения

рис. 16. Гистограмма и кривая статистического распределения сопротивления вращательному срезу:

по горизонтали — сопротивление вращательному срезу в кГ/см², по вертикали — частота распределения

Предельное сопротивление сдвигу определяется по формуле

$$\tau_{\text{пред}} = M/\Sigma W \text{ кГ/см}^2,$$

где P — вертикальная нагрузка на штамп, кГ, M — крутящий момент, кГсм, d — диаметр отпечатка конуса, см, ΣW — суммарный момент сопротивления поверхности сдвига, см³.

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

где D — ширина лопастей, см, h — глубина вдавливания, см.

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 и более часто. На графике (рис. 13) представлены характерные кривые вдавливания ПРОП на различных элементах рельефа. Как видно, наибольшее сопротивление представляли участки поверхности, усыянные камнями, а наименьшее — кольцевые валы кратеров. Результаты повторного вдавливания ПРОП в одном и том же месте представлены на рис. 14. Кривые свидетельствуют о способности лунного грунта к значительному уплотнению и упрочнению при повторном нагружении. Это имеет большое практическое значение для проектирования многоколесных шасси и для разработки технологических процессов при уплотнении грунтов Луны различными механизмами.

Многочисленные повторения 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-1» (рис. 15) и статистическое распределение сопротивления вращательному срезу (рис. 16).

Оказалось, что наиболее частое значение несущей способности — $0,34 \text{ кг/см}^2$ при колебаниях от $0,2$ до $1,0 \text{ кг/см}^2$, а сопротивления вращательному срезу в среднем $0,048 \text{ кг/см}^2$ при колебаниях от $0,02$ до $0,09 \text{ кг/см}^2$. Ученые, проводившие обработку экспериментов, считали, что сопротивление вращательному срезу может быть отождествлено со сцеплением грунта. Однако в силу специфических условий проведения экспериментов значительное сцепление может быть несколько преувеличено 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 $0,02—0,03 \text{ кг/см}^2$.

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 $0,5—0,9 \text{ кг/см}^2$. Однако в большинстве случаев в кривые вдавливания имели плавный характер, что свидетельствует о более или менее однородной структуре грунта верхнего слоя толщиной $5—10 \text{ см}$.

Чтобы обнажить более глубокие слои грунта, луноход время от времени делал несколько разворотов на одном месте, в результате чего верхний слой в $8—10 \text{ см}$ смещался. Последующие измерения с помощью ПРОП показали, что у подстилающего слоя анатомические свойства более высокие: несущая способность 1 кг/см^2 , а сопротивление вращательному сдвигу $0,06 \text{ кг/см}^2$.

Оценка механических свойств грунта проводилась также по образованиям поверхности, возникавшим после проезда машины; для этой цели использовались телефотопанорамы. Свойства грунта оценивали по глубине колеи и характеру его деформаций при поступательном движении лунохода и его повторных проходах. Анализ фотопанорам показал, что верхний слой грунта состоит из мелких зерен, большая часть которых лежит за пределами разрешения приборов. Мелкие пылеватые зерна обнаруживаются также в более светлых участках на поврежденной поверхности.

Под колесами лунохода грунт слегка уплотнялся и местами смещался в стороны. Возникали местные сдвиги, образующие трещины и комья. Комья под колесами рассыпались на мелкие зерна. Все эти явления указывают на существование некоторого сцепления в грунте.

Под легким девятым колесом путеизмерителя наблюдалось

только образование четкой колеи глубиной $0,5—1,0 \text{ см}$ без заметного выпирания грунта в стороны, что говорит о рыхлом характере самого верхнего слоя (рис. 17).

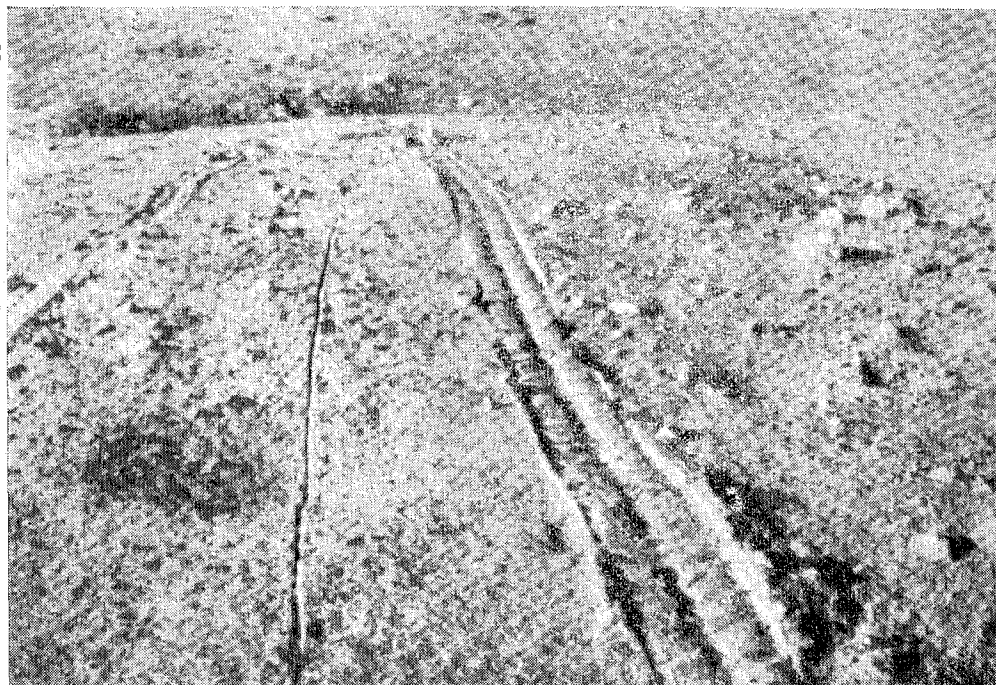
При движении по горизонтальной поверхности глубина колеи от главных колес машины колебалась в пределах от 1 до 5 см . При подъеме на склон она увеличивалась за счет проскальзывания. Наибольшие деформации происходили при поворотах машины, когда глубина колеи увеличивалась до 10 см . Самые глубокие колеи 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 проезде колес, комья рассыпались под их нажимом.

«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.

Рис. 17. Поверхность лунного грунта после прохода «Лунохода-1»:

узкая колея оставлена девятым колесом, слева и справа от нее широкое колеи основных колес



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 геологоморфологическими 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.

Механические свойства грунта по трассе движения «Лунохода-2» изменялись в широких пределах. Несущая способность колебалась от 0,1 до 1—1,5 кг/см², но общий характер распределения механических характеристик грунта по поверхности близок к данным, полученным с борта «Лунохода-1».

При измерении механических свойств лунного грунта были обнаружены участки с повышенной сжимаемостью, а также с большим 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 нессыпавшихся стенок и ошквов.

Самый верхний слой глубиной 10—20 мм особо рыхлый, и несущая способность его составляет 0,02—0,04 кг/см². Статистическая кривая распределения несущей способности слоя в 100 мм низка 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% 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; 5% случаев были встречены очень рыхлые отложения с несущей способностью менее 0,15 кг/см².

Максимальный угол подъема, преодолеваемый «Луноходом-2», составлял от 22 до 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.

При ударно-взрывном возникновении лунного кратера вокруг него образуется вал из частиц грунта, перенесенных по баллистическим траекториям. При этом скорость падения частиц на валу 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 осадки частиц, что не способствует плотной укладке.

ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИМИ ЛУННЫМИ СТАНЦИЯМИ «СЕРВЕЙЕР»

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЙОНЫ РАБОТЫ

Программа «Сервейер» предусматривала в первую очередь получение уточненных данных о микрорельефе, химическом и радиометрическом составе грунтов и их механических свойствах, необходимых для планирования посадок лунных кабин ракет «Аполлон» и деятельности их экипажей на поверхности Луны. Поэтому выбор мест посадки АЛС «Сервейер» был сделан учетом программы «Аполлон». Вначале исследовались карты Луны, составленные астрономическими методами, а затем результаты съемок космическими аппаратами «Рейнджер» и искусственными спутниками Луны — «Лунар Орбитер».

Для выполнения намеченных исследований грунтов на АЛС «Сервейер» были установлены телевизионные камеры с высокой разрешающей способностью, радиометрический прибор для определения химического состава грунта по спектру рассеянного ультрафиолетового излучения, манипулятор с экскаваторным ковшем и многочисленные датчики и акселерометры для определения ускорений в элементах шасси. В научные исследования грунтов по программе «Сервейер» большой вклад внесли американские ученые Л. Д. Джаффе, Р. Ф. Скотт, Е. М. Шумейкер, Л. Туркевич, Е. М. Кристенсен и другие, труды которых использованы при составлении настоящей главы.

Всего было осуществлено пять успешных посадок АЛС «Сервейер»: четыре — в экваториальном поясе видимого полушария Луны в морских районах, а пятая — в гористом районе у кратера Схо (табл. 4).

Авторы пользуются случаем принести здесь свою благодарность Л. Д. Джаффе и Р. Ф. Скотту за присланные ими статьи книги по исследованиям грунтов Луны, проведенным в США.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АЛС «СЕРВЕЙЕР» И ИХ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ

Внешний вид аппарата «Сервейер» представлен на рис. 18. Аппарат сделан из алюминиевых труб. Она имеет три задочных ноги с амортизаторами и опорами. Опоры и аморти-

зирующие блоки, укрепленные на каждой ноге, выполнены из алюминиевых сот, за счет деформации которых поглощается энергия посадочного удара. В двух отсеках с контролируемой температурой размещена электронная аппаратура, на вертикальной мачте находятся солнечные батареи и плоская антенна высокого разрешения.

Таблица 4

Характеристика мест посадки и исследований грунтов Луны автоматическими станциями «Сервейер»

АЛС и время ее работы на Луне	Район посадки	Экспериментальные исследования
«Сервейер-1» 2/VI 1966— 7/И 1967	Океан Бурь. Морская равнина внутри кратера Флэмстид	Телефотосъемки поверхности грунта. Получение данных об усилиях и ускорениях элементов шасси при посадке
«Сервейер-3» 20/IV 1967— 4/V 1967	Океан Бурь. Склон кратера диаметром 200 м	То же, а также рытье трапшей и испытание грунтов манипулятором. Съемка отпечатка следа опоры. Вынужденные прыжки при посадке
«Сервейер-5» 11/IX 1967— 17/XII 1967	Юго-запад Моря Спокойствия. Верхняя часть кратера размером 9×12 м	Телефотосъемки поверхности. Радиационно-химический анализ грунта. Определение магнитных свойств
«Сервейер-6» 10/XI 1967— 14/XII 1967	Срединный залив. Плоская равнина морского типа	То же
«Сервейер-7» 10/И 1968— 21/II 1968	Горный район поблизости от кратера Тихо, покрытый отложениями выбросов из него	То же, а также рытье трапшей и испытание грунтов манипулятором

Аппарат имел основной тормозной двигатель твердого топлива и три жидкостных верньерных двигателя (служащих для управления посадкой), а также сопла, питаемые сжатым азотом.

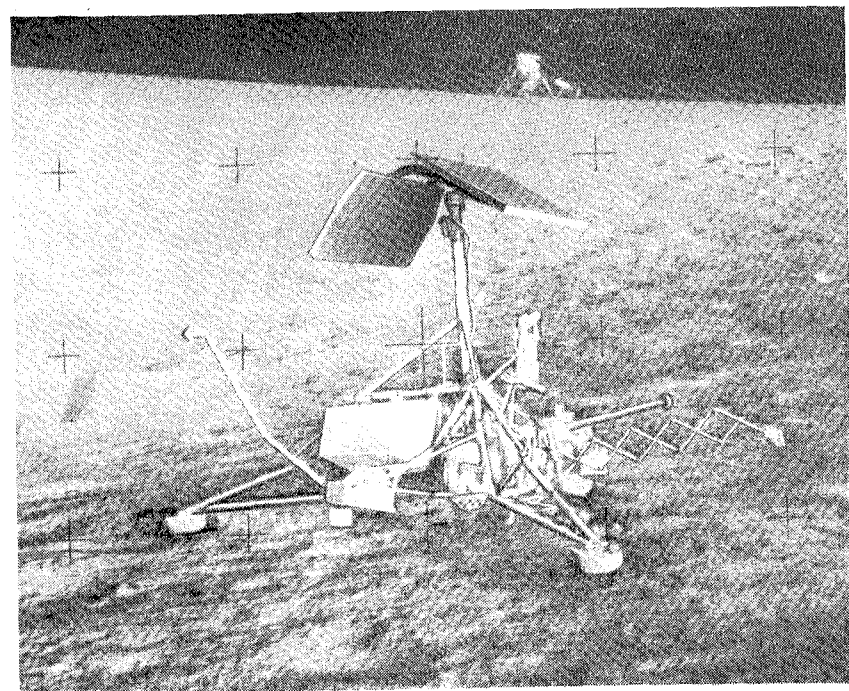
На «Сервейере-1» были установлены телевизионная система и около 100 датчиков для измерения температур, напряжений, положения подвижных элементов аппарата, а также акселерометры. Последние использовались, в частности, для построения траекторий прыжков аппаратов «Сервейер-3 и -6» под действием тяги верньерных двигателей. Специальной научной аппаратуры на «Сервейере-1» не было. Телевизионная система могла работать в двух режимах: с разложением изображения на 200 или на 600 строк. Разрешающая сила ее была 0,5 мм на расстоянии 1,6 м от камеры.

На аппаратах «Сервейер-3 и -7» были установлены манипуляторы для исследования поверхностного слоя лунного грунта, а аппаратах «Сервейер-5, -6 и -7» — альфа-радиометры для химического анализа грунта, а также постоянные магниты на порох для выявления магнитных свойств грунтов. На всех аппаратах, кроме «Сервейер-1», устанавливались зеркала, позволявшие вести съемку в местах, недоступных для прямой видимости телекамеры.

Доставка аппаратов «Сервейер» к Луне осуществлялась ракетной системой «Атлас-Кентавр», а посадка в заданную точку — помощью основного тормозного двигателя, который заканчивал свою работу и отбрасывался на высоте около 10 км, после чего замедление спуска осуществлялось верньерными двигателями.

Чтобы предохранить поверхность грунта от воздействия газовых струй, верньерные двигатели отключались на высоте около 1 м, когда скорость снижения составляла около 1,5 м/с, после чего аппарат свободно падал на поверхность. При посадке «Сервейера-3» произошла задержка с отключением двигателей и аппарат, коснувшись Луны, подпрыгнул и вновь опустился на рас-

рис. 18. Внешний вид автоматической станции «Сервейер-3». На заднем плане «Аполлон-12»



стоянии 20 м с все еще включенными двигателями. Наконец, они были выключены и аппарат окончательно прилунился после второго прыжка длиной 11 м.

Нормальная вертикальная скорость посадки у аппаратов «Сервейер» была в пределах от 3 до 4 м/с, а горизонтальная — 0,5 м/с. У аппарата «Сервейер-3» соответственно от 1 до 2 м/с по вертикали и от 0,3 до 0,9 м/с по горизонтали.

Масса аппаратов «Сервейер» в момент посадки составляла от 294 до 306 кг. Период деятельности их на Луне колебался от 2 недель до 8 месяцев. В общей сложности ими было передано на Землю 87 674 снимка лунной поверхности, деталей опор и деформированного ими грунта.

Следует подчеркнуть очень важную роль телефотокамер АЛС «Сервейер» для выполнения программы исследования грунтов. Эти камеры позволяли производить съемку от 1,5 м до бесконечности с наилучшим разрешением на наименьшем расстоянии 0,5 мм. С их помощью были получены лунные панорамы с изображениями кратеров, крупных обломков и камней, а также детальные снимки поверхности грунта рядом с аппаратом и частей самой АЛС, запыленных лунным грунтом. В результате обработки телефотоснимков были получены данные о гранулометрическом составе лунного грунта, распределения камней и комков на поверхности, деформации грунта при разных воздействиях и многие другие.

Для изучения механических свойств использовались манипуляторы, установленные на «Сервейере-3 и -7». Первоначально манипуляторы были сконструированы только для отбора образцов грунта, однако в дальнейшем они видоизменены так, чтобы с их помощью можно было определять механические свойства поверхностного слоя грунта.

Манипулятор состоял из шарнирного механизма (рис. 19), который мог вытягиваться и сокращаться, поворачиваться направо и налево и передвигаться вверх и вниз. На конце этого механизма был укреплен экскаваторный ковш с подвижной крышкой. Последняя могла быть полностью открыта или закрыта, но не могла занимать промежуточных положений. Положение ковша контролировалось потенциометрами, установленными на валах двигателей, которые осуществляли движения механизма. Удлинение шарнирного механизма производилось заранее сжатыми пружинами, укорочение — электродвигателем обратного хода с помощью тонкой стальной ленты, соединенной с ковшом.

Рукоятка ковша могла быть поднята и затем внезапно опущена для нанесения удара по твердым породам. Сила удара увеличивалась за счет предварительно напряженных торсионных пружин.

Система управления движением ковша путем включения и выключения электродвигателей позволяла установить ковш в заданное положение с точностью до нескольких миллиметров.

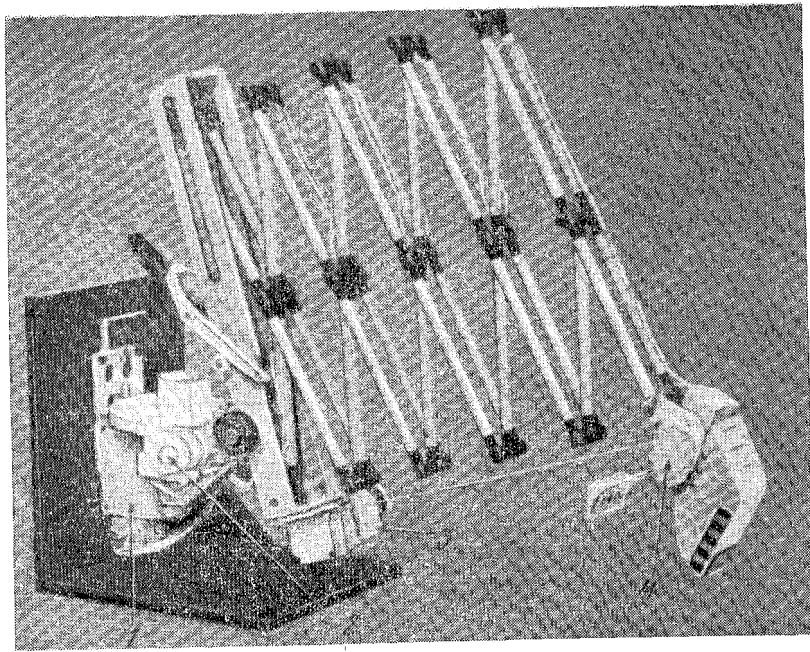


Рис. 19. Общий вид манипулятора автоматической станции «Сервейер-3»: 1 — мотор горизонтального поворота, 2 — мотор подъема, 3 — мотор подтягивания ковша, 4 — мотор крышки ковша

Для измерения усилий, прикладываемых к лунной поверхности, были установлены тензодатчики — один для определения вертикального компонента силы, действующей на ковш, другой для измерения сжимающего усилия, передающегося ковшу. Кроме того, на режущей кромке ковша был укреплен акселерометр для измерения отрицательного ускорения при ударе ковша о поверхность грунта.

Крышка ковша в закрытом положении при наибольшем удлинении механизма использовалась как штамп площадью около 13 см^2 . В открытом положении нижняя кромка ковша в контакте с грунтом имела площадь около $0,5 \text{ см}^2$.

Ковш опускался на точку измерения последовательными импульсами, продолжительностью до 0,1 сек. После того как он вступал в контакт с грунтом, начиналось его вдавливание в глубину. Процесс вдавливания регистрировался тензодатчиком вертикального усилия и потенциометром вертикального перемещения. Одновременно производилась телевизионная съемка.

Максимальное вертикальное усилие составляло около 1350 Г , давление в контакте с грунтом — от 100 до 2700 Г/см^2 при закрытой или открытой крышке ковша.

По окончании опыта с вертикальным нагружением ковш мог быть продвинут в горизонтальном направлении и сопротивление грунта измерено соответствующим тензодатчиком. Измерялось суммарное усилие, складывающееся из сопротивления грунта и силы, необходимой для приведения в движение самого механизма. Поэтому предварительно проводились калибровочные опыты, при которых ковш перемещался над поверхностью грунта, не вступая с ним в контакт.

Совершая аналогичные движения, манипулятор мог рыть траншеи. Теоретически глубина траншеи могла достигать 45 см. Практически она зависела от свойств грунта, потребления энергии и времени, отведенного на эту работу. В процессе рытья траншеи можно повторять опыты с вертикальным нагружением для выявления изменений свойств грунта по глубине.

В ходе рытья траншеи велась фотосъемка, которая давала материалы для суждения о гранулометрическом составе грунта, угле естественного откоса и наличии сцепления.

При нанесении удара ковшом манипулятора по грунту на осциллограмме регистрировались изменения ускорения по времени. Положение и величина пика осциллограммы зависели от скорости нанесения удара и свойств грунта. Скорость определялась высотой падения ковша, высота пика — жесткостью грунта. Высокочастотные вибрации характеризовали зернистую, пористую или плотную структуру. Расшифровка подобных осциллограмм велась на основе результатов испытаний различных грунтов в земных условиях.

Ударные воздействия ковшом манипулятора использовались для оценки усилий, необходимых для разрушения мелких камней. Сила пружины и прочность манипулятора были достаточны для того, чтобы с его помощью раздробить обычный строительный кирпич.

Поскольку вертикальное усилие могло измеряться, стало возможным взвешивание камней или комьев, захваченных ковшом. Телефотосъемка позволяла определить объем взвешиваемого предмета, и таким образом мог быть приближенно оценен объемный вес материала с погрешностью в пределах 20—30%. Этого было достаточно для суждения о том, является ли порода плотной или пористой, однако на основании такого опыта нельзя отличить пористый материал типа пензы от комка из отдельных слипшихся зерен.

Манипулятор можно было использовать и для установки в разных точках исследуемого участка альфа-радиометра, который определяет химический состав грунта. С его помощью могли производиться расчистка поверхности на заданную глубину, а также различные испытания грунта на этой отметке.

Крышка ковша манипулятора могла использоваться для захвата отдельных камней и комьев и для их раздавливания с целью оценки прочности.

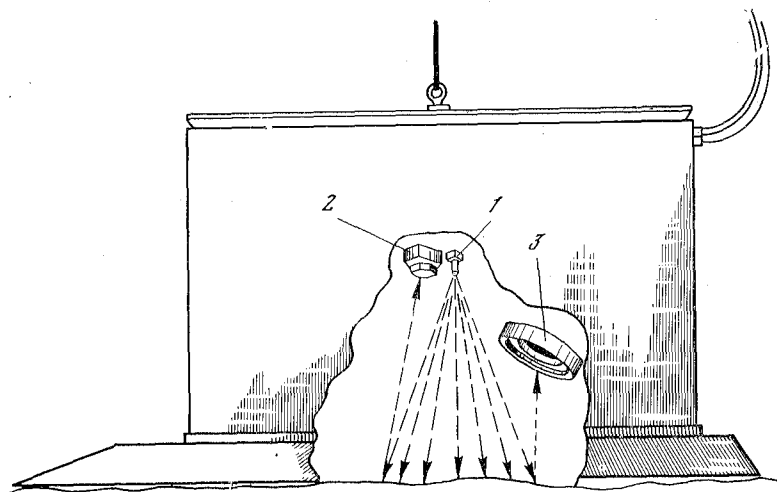


рис. 20. Схема головки альфа-радиометра станции «Сервейер-7»: — источник α -частиц, 2 — детектор α -частиц, 3 — детектор протонов

Для определения химического состава поверхностного слоя реголита был применен радиационно-химический метод. Измерения проводились специальными приборами — альфа-радиометрами. На аппаратах «Сервейер-5 и -6» такой прибор можно было ставить только в одной точке поверхности, на «Сервейере-7» его можно было ставить в разных местах.

Принцип действия прибора состоит в том, что он испускает поток альфа-частиц, направленный на поверхность грунта. В результате их соударения с атомами различных элементов происходит рассеяние альфа-частиц и излучение протонов, возбуждаемое альфа-частицами. Часть рассеянных альфа-частиц и протонов возвращаются к прибору, где установлены два детектора, защищенные от первичного излучения. Один детектор регистрирует рассеянные альфа-частицы, второй — протоны. Специальное устройство исключало влияние заряженных частиц космического происхождения. В результате работы прибора получали спектр альфа-излучения и протонного излучения исследуемого грунта, а тем его сравнивали со спектрами различных горных пород Земли, состав которых был детально изучен.

Альфа-радиометр конструктивно разбит на два блока — головку датчика и электронный блок. Головка датчика (рис. 20) пускалась на поверхность грунта после прилунения АЛС, электронный блок размещался в одном из отсеков станции.

Источником альфа-излучения служил радиоактивный элемент цезий-242, помещенный в головке прибора. Электронный блок

имел 128-канальную схему для регистрации частиц различной энергии, что позволяло получить спектр с достаточным разрешением.

Головка датчика после прилунения АЛС освобождалась из транспортного положения и с высоты 56 см опускалась на место измерения. Место установки головки попадало в поле зрения телекамеры, и по глубине отпечатка головки можно было судить о механических свойствах грунта.

ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ СЛОЯ РЕГОЛИТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

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.

Толщина реголита может быть определена различными путями. Один из них состоит в определении глубины кратеров, кольцевые вала которых сложены крупными скальными обломками. Частично эти кратеры углублены в подстилающий скальный слой, и их глубина несколько больше толщины слоя реголита. Толщина реголита в местах посадки аппаратов «Сервейер» определялась первоначальной глубиной наименьших кратеров с крупнообломочными валами и первоначальной же глубиной наибольших свежих кратеров, в валах которых совсем нет 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 реголитом слое имеются крупные пустоты, куда может утекать слабосвязанный пылеватый грунт, образующий реголит. В результате такой утечки должны образоваться кратеры, лишённые кольцевого вала. Такого типа удлиненные кратеры имеются в месте посадки «Сервейера-5». Толщина реголита может быть определена, исходя из угла естественного откоса склонов этих кратеров — около 35° и ширины по верху по наименьшей оси.

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

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

«Сервейер-1» «Сервейер-3» «Сервейер-5» «Сервейер-6» «Сервейер-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 одно-

Таблица 5

Толщина слоя реголита по измерениям АЛС «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

временно уничтожаются старые, но общее их число и распределение по размерам остаются постоянными. Такое положение 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 аппаратов «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 продолжавшейся 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, на основании анализа размеров кратеров в местах посадки аппаратов «Сервейер» были получены данные о вероятной толщине реголита, приведенные в табл. 5.

Крупнообломочный материал

От 4 до 18% поверхности Луны занято частицами крупнее 1 мм, относящимися к крупнопесчаным гравелистым и крупнообломочным. Они распределены в общем неравномерно, однако крупные обломки группируются вокруг некоторых больших кратеров. Наибольшее количество крупнообломочного материала обнаружено в месте посадки «Сервейера-7», наименьшее — «Сервейера-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.

Удельный вес одного из камней, измеренного и взвешенного «Сервейером-7», оказался равным 2,8—2,9 Г/см³. 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.

Мелкозернистый материал

Градулометрический состав мелкозема 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 аппарата или газовых струй. Нарушенные участки изучались отдельно, как и участки отложения обломков, выброшенных из близлежащих кратеров.

На каждом месте посадки подсчитывалось количество зерен и камней, различимых на снимке, крупность которых лежала в пределах от 1 мм до 1 м. Общее количество подсчитанных частиц колебалось от 1 тыс. до 2,8 тыс. для каждого обработанного снимка. Обработке подлежали снимки, сделанные при высоком положении Солнца, на которых четко выделяются отдельные резко очерченные элементы. К тому же почти все учтенные частицы были на снимках ярче фона из мелких зерен, лежащих за пределами разрешения.

Крупные обломки горных пород легко различаются на снимках и поддаются измерению. Данные по этим крупным объектам наиболее точны. Все подсчеты велись одним и тем же исследователем, и индивидуальную ошибку наблюдателя при всех подсчетах можно считать одинаковой. Точность подсчета зависит от угла солнечного освещения и качества изображений. С этой точки зрения данные по «Сервейеру-3» относятся к наименее точным.

На рис. 21 представлены усредненные кумулятивные кривые распределения размеров зерен на поверхности для всех площадок, исследованных АЛС «Сервейер». Они построены в билогарифмическом масштабе методом графического сглаживания без применения статистического анализа и метода наименьших квадратов. В пределах $1 \text{ мм} \leq D < k^{-\frac{1}{\gamma}}$ уравнения этих графиков имеют вид

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

где N — число зерен, диаметр которых равен или больше D на площадке в 100 м^2 , D — диаметры (в мм) частиц, различимых глазом на снимках.

Переход от распределения частиц на поверхности к их распределению в объеме верхнего слоя реголита был сделан на основе трех допущений: наименьшая крупность частиц равна одному микрому; пористость реголита равна 50%; отношение площади, занимаемой на поверхности частицами данной крупности, к общей площади подсчета равно отношению объема частиц той же крупности к общему объему образца.

Выбор минимальной крупности зерен, равной $D=1 \text{ мкм}$, был сделан, исходя из следующих соображений:

оптические свойства лунного грунта (поляризметрические и фотометрические) могут быть достаточно точно воспроизведены на минеральных порошках в лаборатории при условии, что весь материал проходит сквозь сито с отверстиями 20 мкм;

низкая степень поляризации света, рассеянного лунной поверхностью, свидетельствует о том, что многие зерна имели размеры немногим больше предела, установленного для дифракции, т. е. около 1 мкм;

гранулометрический анализ продуктов дробления при образовании кратеров путем удара или взрыва показал, что при этом образуются частицы крупностью 1 мкм;

большинство силикатных минералов, образующих горные породы, невозможно механически раздробить на зерна значительно более мелкие, чем 1 мкм;

в межпланетном пространстве частицы мельче 1 мкм подвергаются выносу за пределы солнечной системы под давлением света. Большая часть межпланетной пыли имеет крупность от 1 до 10 мкм, но частицы субмикронных размеров отмечены лишь в малых количествах.

Рис. 21. Кумулятивные кривые распределения камней, комков и отдельных зерен на поверхности лунного грунта по результатам съемок всех «Сервейеров»:

по горизонтали — крупность частиц D , по вертикали — содержание частиц крупнее заданного диаметра D на 100 м^2 поверхности

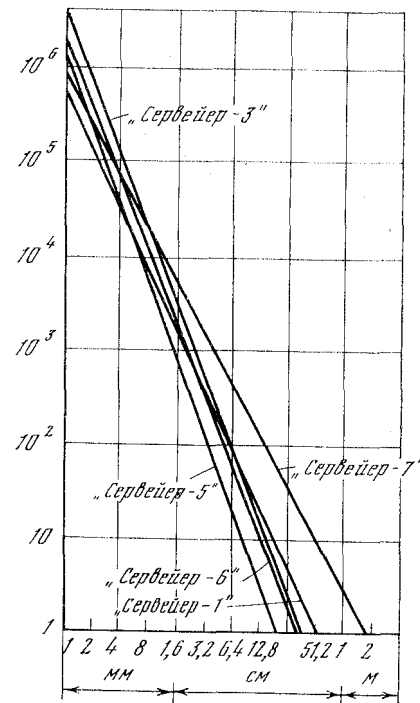
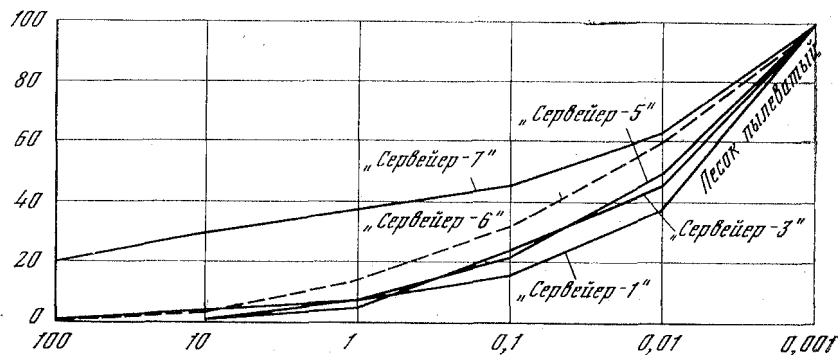


Рис. 22. Кумулятивные кривые распределения частиц лунного грунта по крупности:

по горизонтали — диаметры частиц в мм, по вертикали — содержание частиц крупнее заданного диаметра в процентах по объему



В результате анализа были построены графики распределения частиц разной крупности по объему, представленные на рис. 22. При такой гранулометрии реголит в точках посадки «Сервейера-1, -5 и -6» по советской строительной классификации грунтов относится к песку пылеватому, а в местах посадки «Сервейера-3 и -7» — к песку мелкому. Средний диаметр частиц по всем определениям аппаратов «Сервейер» составляет 33 мкм и колеблется в пределах от 4,9 до 88 мкм.

«Сервейер-3» при посадке, как уже говорилось, совершил два прыжка, и на поверхности грунта остались отпечатки его опор. Один из них попал в поле зрения телевизионной камеры и был сфотографирован. На фотографии отчетливо видна вафельная структура отпечатка. Конструкция опоры была такова, что максимальные местные прогибы нижнего листа, придавшие вафельный вид поверхности контакта опоры с грунтом, не могли превышать 100 мкм. Чтобы получить такой отпечаток, в грунте должно содержаться значительное количество зерен мельче 60 мкм. Специальные опыты показали, что подобный отпечаток нельзя получить, если грунт содержит много зерен крупностью 100 мкм. Добавка 20% зерен крупностью 50 мкм существенно ухудшает четкость отпечатка, который получается на более тонкозернистом грунте.

Анализируя причины образования яркого ореола на горизонте Луны после захода Солнца по снимкам «Сервейера-6», Джаффе пришел к выводу, что если этот ореол вызван дифракцией света на зернах грунта, то средняя крупность последних должна быть менее 100 мкм.

Исходя из других оптических феноменов, Голд решил, что большая часть зерен должна иметь крупность менее 10 мкм, а по условиям поляризации света 2—3 мкм и меньше.

Наблюдения за эрозией поверхности под действием газовой струи верньерного двигателя «Сервейера-6» привели к выводу о том, что грунт обладает такой газопроницаемостью, которая соответствует крупности зерен от 2 до 60 мкм.

Эти данные, полученные совершенно иными методами, чем метод фотоанализа, в общем согласуются с ранее приведенными и между собой. В итоговом отчете по программе «Сервейер» сказано, что главная масса частиц, из которых состоит верхний слой лунного грунта, имеет крупность от 2 до 60 мкм и только от 4 до 18% лунной поверхности покрыто частицами и обломками крупнее 1 мм.

Результаты определений химического состава лунных грунтов были использованы для обоснованного выбора их аналогов. Сравнение полученных данных с результатами химического анализа земных базальтов, андезита и гранита, а также вещества каменных метеоритов и тектитов показало, что из всех метеоритов только эвкриты более или менее близки по своему составу к лунному реголиту в месте посадки «Сервейера-6». Тектиты резко

отличаются от реголита. Гранит не может служить хорошим аналогом, как и андезит. Лучшее подходит анортозитовое габбро. По мнению американских ученых, простейшим материалом для моделирования грунтов морских районов Луны является базальт. Для горной области — базальт с низким содержанием железа.

Различное содержание железа может обусловить разницу в отражательной способности (альбедо) лунных пород в морских и горных районах. Железо относится к элементам, которые наиболее интенсивно поглощают свет в видимой части спектра.

На основании химических анализов были сделаны попытки создать минералогические модели лунных грунтов и подсчитать удельный вес полученных материалов. Оказалось, что в основном он зависит от содержания плагиоклаза в породе и железа в пироксенах. Небольшие примеси металлического железа также сильно влияют на удельный вес.

Было составлено и проанализировано 11 минералогических моделей для горных районов и 4 для морских. Анализ полученных данных и сравнение их с анализами «Сервейера-5, -6 и -7» привели к выводу, что для горных районов наиболее обоснованное значение удельного веса лунного грунта $3,0 \pm 0,05 \text{ Г/см}^3$; для морских районов — $3,2 \pm 0,03 \text{ Г/см}^3$.

Существенная разница объясняется главным образом неодинаковым содержанием железа.

Эксперименты с магнитами показали, что мелкозернистые фракции грунта налипали на них. Предварительными лабораторными тарировками было установлено, что налипающий материал должен быть сходен с земным базальтом, а содержание свободного железа в нем по объему не менее 0,25%.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕГОЛИТА

При обработке опытных данных, полученных АЛС «Сервейер», оценка механических свойств грунтов проводилась по глубине отпечатков мелких камешков, глубине погружения головки датчика альфа-радиометра, глубине вдавливания амортизационных блоков и опор. Кроме того, учитывались высота и крутизна откосов, образующихся при вдавливании элементов шасси в грунт, сопротивление грунта эрозии от газовой струи двигателей и скорость распространения в грунте продольных и поперечных волн.

Следует сказать, что все эти данные были получены, так сказать, понуто, путем использования фотоснимков поверхности и телеметрической информации об усилиях и ускорениях в элементах шасси. Большинство экспериментов этого ряда были единичными, а условия их проведения в большой мере случайными. Поэтому полученные данные следует рассматривать как сугубо приближенные.

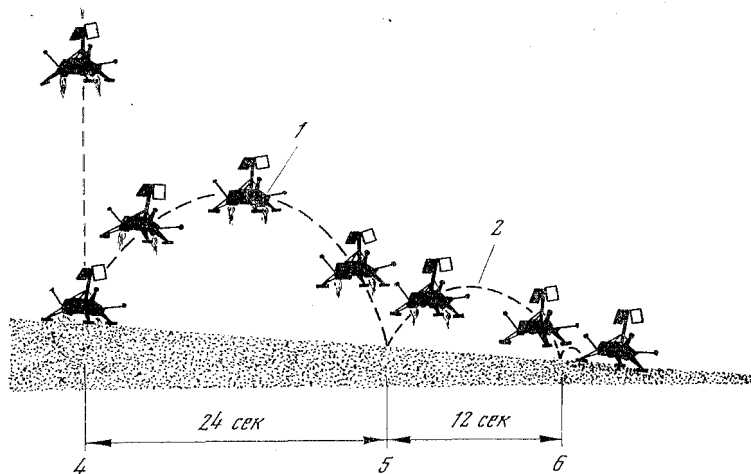


Рис. 23. Схема прыжков АЛС «Сервейера-3», возникших вследствие несвоевременного выключения верньерных двигателей при посадке:

1 — первый прыжок, 2 — второй прыжок

Более систематический характер носили опыты с манипуляторами, установленными на АЛС «Сервейер-3 и -7».

Станции «Сервейер» выполнили ряд работ, связанных с определением механических свойств грунта.

«Сервейер-1» не имел специального оборудования для изучения механических свойств грунта, но телевизионная система передала снимки опор и амортизатора, по которым можно было установить глубину их вдавливания, а телеметрическая система передала данные об усилиях и ускорениях, действовавших на опоры в процессе посадки. Посадка была совершена на ровную, почти горизонтальную поверхность.

«Сервейер-3», как уже говорилось, совершил посадку с двумя прыжками (рис. 23) на площадку с наклоном поверхности 10—14°.

С помощью манипулятора, под контролем телевизионной камеры, он сделал лунки глубиной до 5 см, бороздки и канавки. Крупных камней не встретилось. На глубине 12,5 см был найден небольшой комок грунта, который затем раскрошился. Камень размером 2,5 см раскрошить не удалось. Еще один комок, объемом около 30 см³, был захвачен ковшем и затем сброшен с высоты 0,6 м на опору АЛС. При падении он раскрошился.

Затем были вырыты четыре траншеи, глубиной от 7,5 до 18 см и длиной от 25 до 60 см. Трижды наносились удары ковшем манипулятора по грунту.

«Сервейер-5» вел телефотосъемку и выполнял работу с альфа-радиометром, а также опыты с кратковременным включе-

нием верньерных двигателей для выяснения возможности эрозии грунта, появления воронок и возникновения облаков пыли. Сильный уклон поверхности привел к скольжению АЛС и образованию борозд под опорами при посадке.

«Сервейер-6» проводил аналогичные эксперименты на плоской горизонтальной площадке. Кроме того, по команде с Земли все три верньерных двигателя аппарата были включены на 25 сек. и он поднялся на высоту 3 м, совершив прыжок длиной 4 м. В результате удалось сфотографировать участки поверхности, деформированные элементами конструкции шасси при первой посадке аппарата и оценить эрозию поверхности газовыми струями ЖРД.

«Сервейер-7» совершил посадку на поверхность, усыпанную камнями и обломками, наклоненную под углом 3°. С помощью манипулятора была вырыта траншея глубиной 15 см и собран в кучу грунт для исследования химического состава альфа-радиометром. В двух случаях прочный подстилающий слой помешал дальнейшему углублению траншей.

В итоговом отчете по программе «Сервейер» сказано, что несущая способность верхних миллиметров грунта меньше 0,01 кг/см². Опыты с головкой датчика альфа-радиометра показали для верхних 1—2 мм грунта несущую способность порядка 0,02 кг/см². По отпечаткам амортизирующих блоков АЛС «Сервейер-5 и -6» несущая способность на глубине около 2 см равна 0,18 кг/см². На глубине около 5 см, по результатам измерения вдавливания опор «Сервейера-1», она повышается до 0,55 кг/см²*

Рассмотрим несколько подробнее результаты наблюдений за деформациями грунта при воздействии на него амортизационных блоков и опор АЛС «Сервейер», поскольку они имеют наибольшее практическое значение.

Корпус амортизационного блока образован вертикальными алюминиевыми сотами и полностью разрушается при давлении в подошве свыше 2,8 кг/см². Внутри корпуса проходит цилиндрический вертикальный канал, снизу закрытый листом гофрированного алюминия, который начинает прогибаться при давлении 0,24 кг/см² и разрушается при 0,28 кг/см². Эти цифры характеризуют нагрузки, которые может воспринять блок на разных стадиях его деформации. Прямое измерение нагрузок не проводилось.

В момент посадки амортизационный блок входит в контакт с поверхностью грунта и передает ему часть нагрузки от АЛС. После распрямления шасси блоки приподнимаются и появляется возможность сфотографировать деформированную поверхность грунта.

Отпечаток амортизационного блока «Сервейера-1», сфотографированный после удара, представляет собой цилиндрическое

* Термин «bearing capacity», который переведен здесь как «несущая способность», относится к среднему давлению на площадке контакта вдавливаемого в грунт тела с грунтом на указанных здесь глубинах.

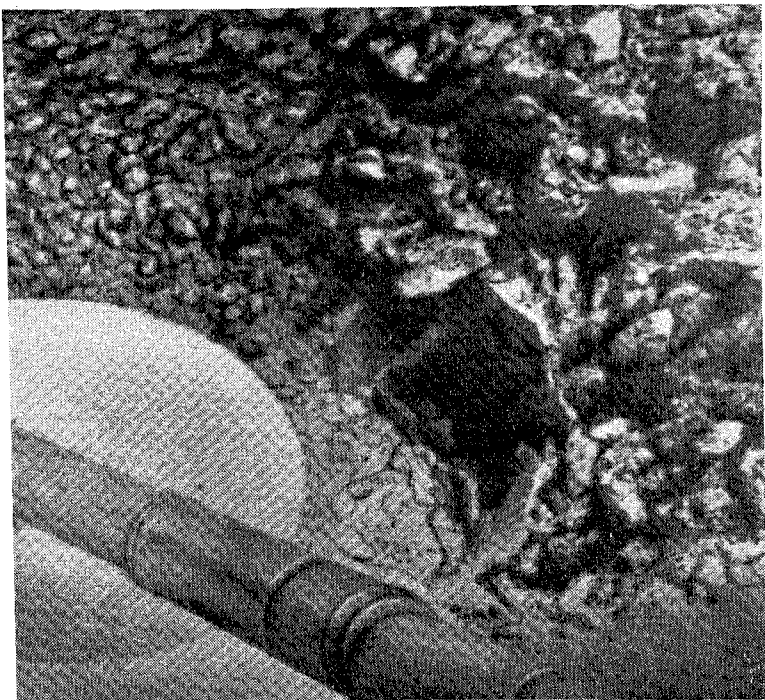


рис. 24. Поверхность лунного грунта, деформированного опорой АЛС «Сервейер-6»

глубление с вертикальными стенками глубиной 2—3 см. На других АЛС были получены следующие глубины: «Сервейер-1» — 5 см, «Сервейер-6» — 5,8 см, «Сервейер-7» — 3 см. На дне отпечатка амортизационного блока «Сервейера-6» видно выпуклое возвышение в центре. По-видимому, грунт продавил гофрированную диафрагму, проник в канал внутри блока, а затем высыпался обратно. Если считать, что разрушение произошло в конце вдавливания, то несущая способность составит $0,28 \text{ кг/см}^2$. Однако более подробный анализ, сделанный американскими специалистами, дает среднее значение для «Сервейера-6 и -7» — $0,18 \text{ кг/см}^2$. По глубине вдавливания и среднему давлению в подошве для амортизационных блоков этих АЛС можно определить значение модулей деформации, соответственно равное $0,42$ и $0,33 \text{ кг/см}^2$.

Благодаря прыжкам «Сервейера-3 и -6», а также горизонтальным перемещениям опор в процессе прилунения, отпечатки которых из них становились доступными для фотографирования и обмера (рис. 24).

По характеру деформаций поверхности грунта, глубине отпечатков и количеству выброшенного наружу материала воздействие

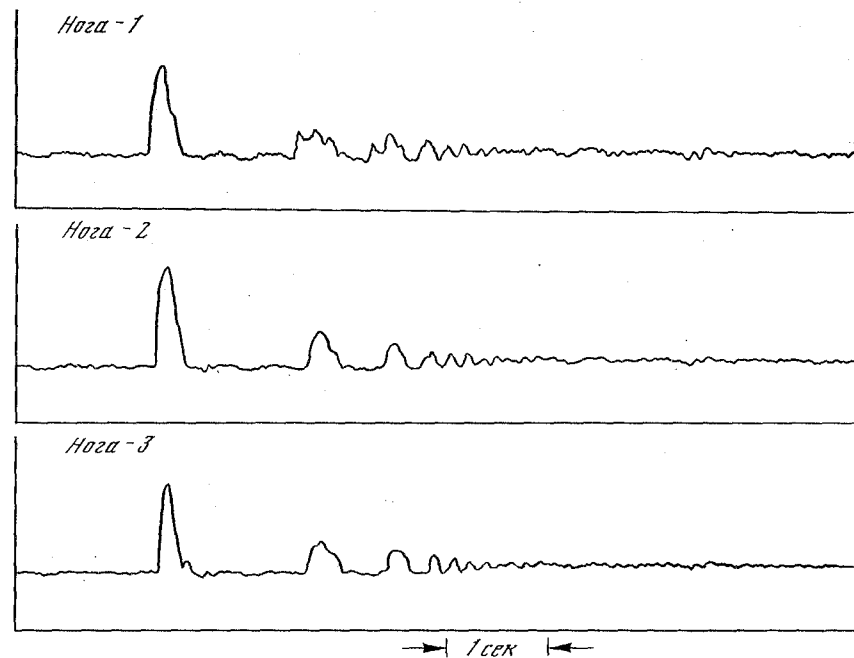


Рис. 25. Осциллограммы осевых усилий в амортизаторах трех ног «Сервейера-6»:

по горизонтали — время, по вертикали — усилие в амортизаторе

опор «Сервейера-1, -6 и -7» на лунный грунт было аналогичным. Эти станции садились почти вертикально на слабонаклоненные участки. «Сервейер-3» сел на склон в $10-14^\circ$, а «Сервейер-5» на склон в $19-20^\circ$. Их опоры пропахали в грунте довольно длинные борозды, и на поверхность было выброшено много крупных комьев, что указывает на увеличение связности грунта с глубиной.

На рис. 25 представлена осциллограмма осевых усилий в трех стойках шасси «Сервейера-6» при посадке. На основании таких осциллограмм можно вычислить вертикальное давление под опорами. АЛС опускалась со скоростью $1,4 \text{ м/с}$. На высоте $3,0 \pm 0,1 \text{ м}$ были выключены верньерные двигатели и станция перешла к свободному падению, в ходе которого набрала скорость $3,4 \pm 0,1 \text{ м/с}$ по вертикали и $0,3 \pm 0,06 \text{ м/с}$ по горизонтали. Первый удар о грунт длился $0,2-0,25 \text{ сек.}$ у разных опор, затем станция на 1 сек. отделилась от поверхности и вновь ударилась о нее два раза с уменьшающейся силой.

Через неделю были вновь включены верньерные двигатели на $2,6 \text{ сек.}$ и станция сделала прыжок вверх и в сторону, после

которого удалось четко сфотографировать следы опор, оставленные при первом ударе. По этим снимкам были построены профили отпечатков и найдены глубины погружения и площади контакта каждой из опор.

Поскольку скорость соударения была небольшой, а точность измерения усилий и перемещений не очень высокой, для первой приближенной оценки несущей способности и сжимаемости грунта можно принять нагрузку статической. Так, максимальная вертикальная нагрузка на опору № 3 АЛС «Сервейер-6» была равна 275 кГ, площадь контакта 520 см² и глубина вдавливания 2,75 см. Соответственно несущая способность равна 0,53 кГ/см²; условный модуль общей деформации $E_0 = 3,7$ кГ/см².

Однако при обработке результатов измерений по программе «Сервейер» применялась другая методика, учитывающая динамический характер соударения. Считая, что деформации происходят по схеме местного сдвига, при котором деформируемый объем грунта под опорой уплотняется от исходной плотности ρ_1 до конечной ρ_2 , используют уравнение Чандейсона для вычисления динамической составляющей несущей способности, зависящей от сил инерции

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

где h — глубина вдавливания, см; v — скорость удара опоры по поверхности, см/с; a — ускорение торможения, см/с²; ρ — плотность грунта, г/см³.

Для опоры № 2 при третьем ударе о поверхность $v = 150$ см/с; $h = 2,5$ см; $a = 1875$ см/с²; $\rho_1 = 1,1$ г/см³; $\rho_2 = 1,7$ г/см³. Максимальное давление под опорой № 2 было $\sigma = 300\,000$ дин/см² = 0,31 кГ/см².

$$\sigma_{дин} = \frac{1,7 \times 1,1}{1,7 - 1,1} (150^2 + 2,5 \times 1875) = 84\,600 \text{ дин/см}^2 = 0,086 \text{ кГ/см}^2.$$

Статическая составляющая несущей способности $\sigma_{стат} = \sigma - \sigma_{дин} = 300\,000 - 84\,600 = 215\,400$ дин/см² $\approx 0,22$ кГ/см².

Динамическая составляющая в данном случае достигла 28% от общей несущей способности грунта.

Помимо описанного метода обработки, использовалось также математическое моделирование процесса посадки, выполнявшееся с помощью ЭВМ. При моделировании учитывались масса АЛС, упругие характеристики шасси и свойства амортизаторов и механические свойства грунта. Последние вводились в расчет в виде реактивного давления под опорой

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

где $\sigma_{стат}$ — статическая несущая способность, дин/см²; ζ — постоянная, зависящая от трения, см⁻¹; h — глубина вдавливания, см; v — скорость соударения, см/сек; ρ — плотность грунта, г/см³;

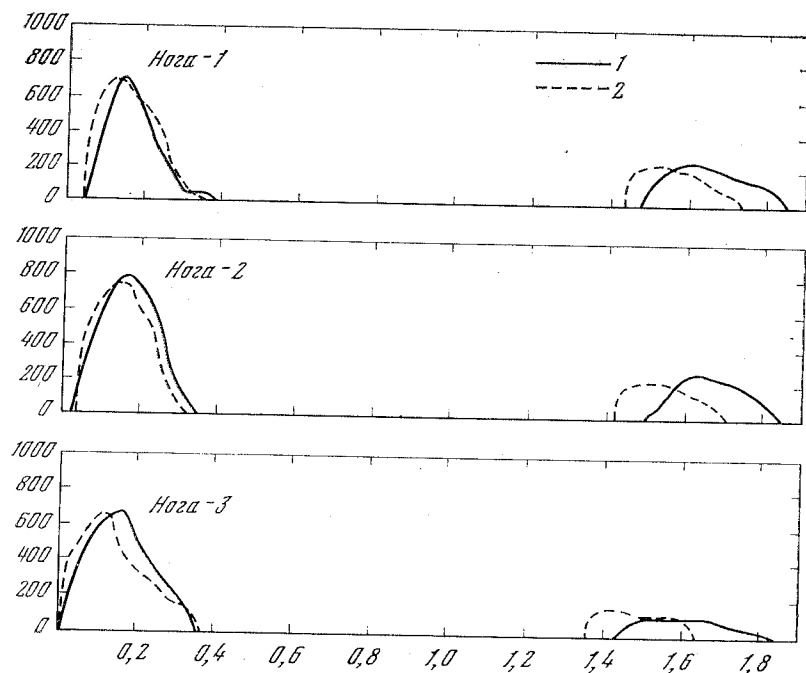


Рис. 26. Сравнение расчетных усилий в амортизаторах с фактически измеренными при посадке «Сервейера-6»:

по горизонтали — время с момента первого соприкосновения с грунтом в секундах, по вертикали — усилие в амортизаторе, 1 — результаты опыта, 2 — результаты расчета

При моделировании задавались различными комбинациями параметров $\sigma_{стат}$; ζ ; ρ_1 ; ρ_2 и строили кривые изменения усилий в ногах шасси по времени для заданной величины v с помощью ЭВМ. Затем эти кривые сравнивали с фактической осциллограммой и выбирали такую комбинацию параметров, при которой получается наилучшее совпадение.

На рис. 26 показаны такие кривые для трех ног шасси «Сервейера-6». Наилучшее совпадение расчетных и опытных данных было получено при $\sigma_{стат} = 0,35$ кГ/см²; $\zeta = 330$ см⁻¹; $\rho_1 = 1,2$ г/см³; $\rho_2 = 1,6$ г/см³. Те же параметры дали наилучшее совпадение для «Сервейера-1, -3 и -7». Для станции «Сервейер-5» лучшие результаты были получены при $\sigma_{стат} = 0,275$ кГ/см²; $\rho_1 = 1,1$ г/см³.

Результаты математического моделирования, в силу приближенности уравнения Чандейсона и малой точности определения исходных параметров, дают представление только о порядке величины несущей способности, которая под опорами АЛС «Сервейер» выражается долями кГ/см².

Упругие свойства лунных грунтов определялись также по частоте колебаний корпуса АЛС, которые возбуждаются ударом и посадке, а затем продолжают некоторое время после того, как опоры окончательно установятся на грунт. Эти колебания регистрировались акселерометрами АЛС и хорошо видны на осциллограммах, переданных на Землю.

У станции «Сервейер-1 и -3» была зарегистрирована частота 5 Гц, у «Сервейера-6» — 6,3 Гц. В то же время собственная частота колебаний корпусов АЛС «Сервейер», установленных на жесткой поверхности, равна $8 \pm 0,8$ Гц. Снижение частоты до 3—6,5 Гц может произойти в результате взаимодействия опор с жестким деформируемым грунтом, который участвует в колебаниях и по которому распространяются волны сжатия и сдвига.

Скорость распространения этих волн зависит от плотности грунта, коэффициента Пуассона и модуля жесткости лунного грунта. Последний же может быть определен, исходя из фактической и резонансной частот колебаний. Расчеты, сделанные американскими учеными для АЛС «Сервейер-3», показали, что при плотности $\rho = 1,0-1,5$ г/см³ и коэффициенте Пуассона $\mu = 0-0,5$ скорость волн сдвига $v_{сдв}$ = 16—28 м/с и волн сжатия $v_{сж}$ = 33—7 м/с.

Такие низкие скорости в грунтах на Земле не наблюдаются, даже в рыхлом песке скорость распространения волн сжатия и сдвига на порядок выше. Очевидно, использование описанного метода пока еще не может дать надежных результатов.

При нагружении поверхности грунта закрытым ковшом манипулятора «Сервейера-3 и -7» на поверхности возникали трещины. По расстоянию крайней трещины от кромки ковша можно определить угол внутреннего трения грунта, а затем, решая уравнение Терцаги или Скотта для несущей способности плоского штампа, можно найти ряд комбинаций плотности грунта ρ и его сцепления c , при которой расчетная несущая способность будет равна измеренной при эксперименте.

Обработывая результаты опытов «Сервейера-3» для несущей способности $0,38$ кГ/см² (нагрузка на ковш 5,0 кГ), Р. Ф. Скотт получил следующие возможные комбинации расчетных параметров:

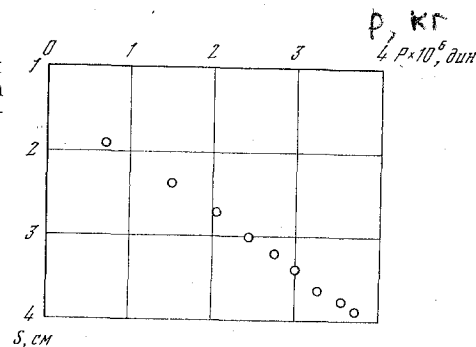
ρ , г/см ³	c , кГ/см ²	ϕ	n , %
1,0	0,0009	42°	67
1,5	0,0014	39°	50
2,0	0,0017	37°	33

В последнем столбце выписаны значения пористости, вычисленные при условии, что удельный вес минеральных зерен грунта равен $\gamma = 3,0$ Г/см³.

Для грунта в месте посадки «Сервейера-7» Р. Ф. Скотт получил аналогичным путем $\rho = 1,5$ г/см³; $c = 0,0036-0,0072$ кГ/см²; $\phi = 37-39^\circ$; $n = 50\%$.

Рис. 27. Зависимость глубины вдавливания ковша манипулятора АЛС «Сервейер-7» от вертикальной нагрузки:

по горизонтали — нагрузка в 10^6 дин, по вертикали — глубина вдавливания в см



На рис. 27 представлена зависимость глубины вдавливания ковша манипулятора «Сервейера-7» от величины приложенной к нему вертикальной нагрузки. Используя этот график, можно найти среднее значение модуля общей деформации.

Принимая в качестве более вероятного значения $\rho = 1,5$ г/см³, получим для грунтов «Сервейера-3 и -7»: $c = 0,0072-0,0014$ кГ/см²; $\phi = 38^\circ$ и $E_0 = 0,35$ кГ/см².

Следует заметить, что приведенный выше расчет по Скотту исходит из предположения о том, что грунт деформируется по схеме общего сдвига по Терцаги. В то же время ряд данных свидетельствует о том, что более правильной была бы схема местного сдвига, использованная, в частности, при динамических расчетах. Такое положение еще раз говорит о недостатке экспериментальных данных и указывает на предварительный характер полученных цифр.

Опоры и амортизационные блоки, деформируя грунт, создавали откосы различной глубины и крутизны, по которым также можно судить о механических свойствах грунта. Вертикальные откосы были получены при рытье траншей манипуляторами «Сервейера-3 и -7». Ровность стенок траншей и хорошо заметные следы работы ковша свидетельствуют о мелкозернистом составе грунта и наличии некоторого сцепления. Глубина траншей в разных опытах колебалась от 1 до 18 см. Наибольшие значения сцепления и трения в грунтах были выявлены при рытье траншей глубиной 18 см «Сервейером-3» и 15 см «Сервейером-7».

Особенности деформаций поверхности

Помимо оценки гранулометрического состава, анализ фотографий позволил получить представление о характере деформации реголита при действии на него местной вертикальной нагрузки от ковша манипулятора «Сервейера-3». Фотографии поверхности лунного грунта, полученные с этой станции, и фотографии, сделанные спустя 2,5 года в том же месте экипажем «Аполло-

«Аполлон-12», показывают, что при деформации грунта ковшем манипулятора или корпусом фотоаппарата образуется сетка трещин. На первый взгляд по снимкам АЛС создается впечатление, что на мягком слое грунта лежит тонкая хрупкая корочка, которая растрескивается под действием нагрузки на отдельные плитки.

Фотографирование тех же самых деформированных участков участков поверхности, которое было сделано позднее участниками экспедиции «Аполлон-12» с помощью ручной фотокамеры, дало совершенно иные результаты. Вместо плоской поверхности, расщепленной узкими трещинами, стал виден сложный рельеф с глубокими вмятинами и крутыми откосами.

Разница объясняется различными условиями освещения при съемке. Фотографии «Сервейера-3» были получены при углах солнца 80 и 40° над горизонтом с запада. Съемка «Аполлона-12» была сделана при угле Солнца 23° над восточным горизонтом. Учитывая уклон поверхности откоса кратера, где стояла АЛС, и зенитный 13°, получим углы падения солнечного света на фото «Сервейера» равными 87 и 53° и на фото «Аполлона» — 10°.

Плоский характер изображений на фото «Сервейера-3» объясняется высоким солнечным углом, при низком угле освещения рельеф поверхности на фото «Аполлона-12» выявляется гораздо лучше. Стероскопические пары, полученные при этом, ясно показывают, что растрескивание грунта не ограничивается тонким

Таблица 6

Результаты определения физическо-механических свойств лунного грунта АЛС «Сервейер»

Свойства грунта	«Сервейер-1»	«Сервейер-3»
структура	Грунт мелкозернистый,	слабосвязный с примесью
рушность зерен	Большая часть мельче 1 мм	Значительная часть мельче 0,06 мм
угол внутреннего трения ϕ	30—40°	35—40°
депленне c , кг/см ²	0,0013—0,0040	0,0015—0,0071
плотность ρ , г/см ³	В среднем 1,5	В среднем 1,5
несущая способность σ , Г/см ²	0,36	0,20—0,51
максимальная глубина открытой толщи грунта	8 см (опора)	17,5 см (манипулятор)

поверхностным слоем. Трещины идут почти вертикально вниз на значительную глубину. Лунный грунт, по-видимому, растрескивается так, как изотропные земные грунты средней плотности, обладающие небольшим сцеплением. Образующиеся при этом блоки имеют приблизительно одинаковые размеры в ширину и глубину.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАЗОВЫХ СТРУЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ГРУНТА, ОБРАЗОВАНИЕ И НАЛИПАНИЕ ПЫЛИ

Газовая струя реактивного двигателя может вызвать два вида разрушения грунта: поверхностную эрозию вследствие уноса минеральных частиц потоком газа в горизонтальном направлении и образование взрывных кратеров. Последние возникают после того, как в поры грунта под значительным давлением проникает газ, а затем производится отсечка двигателя и давление на поверхности внезапно падает до нуля. Стремясь выйти наружу, газ увлекает с собой грунт и вызывает появление небольших кратеров. Оба явления тесно связаны с пористостью и связностью грунта.

Вокруг АЛС «Сервейера-5» после включения верньерного двигателя камни и комки крупностью до 4,4 см, лежавшие на поверхности, были отброшены в стороны, а на поверхности образовался кратер диаметром 20 см и глубиной от 0,8 до 1,3 см.

	«Сервейер-5»	«Сервейер-6»	«Сервейер-7»
структура	Грунт мелкозернистый,	слабосвязный с примесью	слабосвязный с примесью
рушность зерен	Большая часть в пределах 0,002—0,06 мм	То же, что в точках посадки «Сервейера-1 и -3»	То же, что в точках посадки «Сервейера-1, -3 и -6» с большим числом камней
угол внутреннего трения ϕ	37°	37°	37—39°
депленне c , кг/см ²	—	0,005—0,012 (струя)	0,035—0,0071 (манипулятор)
плотность ρ , г/см ³	В среднем 1,1	Верхние миллиметры 0,7—1,2. Верхние сантиметры 1,6	В среднем 1,2—1,5
несущая способность σ , Г/см ²	0,28	Верхние миллиметры 0,01. Верхние сантиметры 0,18. В среднем 0,34	0,34
максимальная глубина открытой толщи грунта	12 см (опора)	9 см (опора)	15 см (манипулятор)

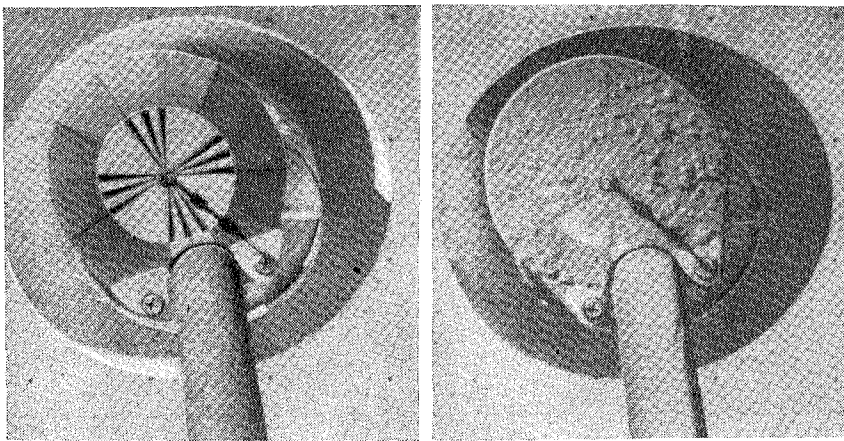


Рис. 28. Фотометрическая мишень АЛС «Сервейер-6» до (слева) и после (справа) налипания пыли

Проницаемость лунного грунта в слое толщиной около 25 см оказалась того же порядка, что у земной пыли с зернами крупностью 0,002—0,06 мм, а сцепление, вычисленное по результатам опыта, оказалось равным от 0,0007 до 0,017 кГ/см².

На рис. 28 представлена фотометрическая мишень АЛС «Сервейера-6», на которую налип толстый слой пыли, поднявшейся во время прыжка аппарата. Внешний вид слоя указывает на мелкозернистый состав пыли и присущую ей связность. В то же время рядом находящиеся части конструкции АЛС, по-видимому, не подверглись запылению. Мишень находилась на высоте 1 м от поверхности и на расстоянии около 2 м от ближайшего верньерного двигателя. Предполагается, что в мишень попал комок грунта, который разбился при ударе и образовал налипший слой. Сила сцепления должна быть достаточной не только для того, чтобы противостоять слабому гравитационному притяжению на Луне, но также и гораздо большим силам инерции при последующем посадочном ударе. Было подсчитано, что силы сцепления составляли от 0,0001 до 0,001 кГ/см².

При кратковременном включении верньерного двигателя «Сервейера-5» позолоченная поверхность головки датчика альфа-радиометра после опыта стала полностью матовой, темно-серой. Пыль, по-видимому, покрыла его равномерным слоем, осаждаясь из поднятого облака, а не в результате попадания комка, хотя некоторые комки, лежавшие на поверхности, были отброшены более чем на 3 м.

Подобные явления наблюдались в лабораторных экспериментах с минеральными порошками крупностью меньше 10 мкм даже без глубокого вакуума. В вакууме они усиливались. С частицами

крупностью 100 мкм этого уже не происходит, даже в хорошем вакууме. Предполагается, что на АЛС «Сервейер-3» часть зеркала телекамеры тоже была покрыта тонким слоем налипшей пыли. Пыль, очевидно, поднялась во время тройного прыжка АЛС при посадке.

Таким образом эксперименты АЛС «Сервейер» показали, что на Луне под действием газовых струй могут подниматься облака пыли, а отдельные комки из слипшихся зерен могут быть с силой отброшены в сторону. В результате может произойти неравномерное запыление конструкции лунных кораблей и их оборудования, а также затруднено управление вследствие снижения видимости при посадке. Сводка результатов определения физико-механических свойств лунного грунта АЛС «Сервейер» приведена в табл. 6.

ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ЛУННЫМИ ЭКСПЕДИЦИЯМИ «АПОЛЛОН»

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 содббе по грунту разной плотности, провести наблюдения за глубиной колеи 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. Были намечены устройство вымок 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 влений 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 районах по морфологическим и геохимическим признакам района Луны. Были 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. 7). Полет корабля «Аполлон-13» сопровождался аварией, и экипаж вернулся на Землю, не высадившись на Луну.

Таблица 7

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

Экспедиция, дата	Район посадки	Исследования грунтов
«Аполлон-11» 16—24/VII 1969	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	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	Кратер Фра-Мауро — южнее моря Дождей. Материковый район, покрытый большим числом кратеров	Отбор образцов (около 43 кг), разработка траншейки, наблюдения за проходимость ручной двухколесной тележки, пенетрация
«Аполлон-15» 26/VII— 7/VIII 1971	Район трещины Хэдли в Аппенинских 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	Горный район центрального плоскогорья. Равнина Хэйли на плоскогорье Декарт	То же, а также применение пенетрометра 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	Горная долина, расположенная у юго-восточной оконечности Моря Яспости, к югу от кратера Литтроу	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 весом 2—3 г, с обязательством вернуть их после оконча-

ний исследований. С Советским Союзом был произведен обмен образцов, доставленных АЛС «Луна-16 и -20», на образцы, привезенные экспедициями «Аполлон».

Несмотря на большое число статей и докладов, посвященных анализам образцов лунных грунтов экспедиции «Аполлон», пока еще нет солидных 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 В. Кэрьер, Дж. К. Митчелл и Р. Ф. Скотт.

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.

Полет к Луне и возвращение на Землю осуществлялись по сложной программе, предусматривавшей выход на первоначальную геоцентрическую орбиту, переход на траекторию Земля — Луна, выход корабля на селеноцентрическую орбиту, отделение и посадку лунной кабины на Луну, работу астронавтов на Луне, старт взлетной ступени с Луны и соединение ее с основным блоком корабля на селеноцентрической орбите. Затем следовали полет к Земле, отделение отсека экипажа и приведение его в заданном районе.

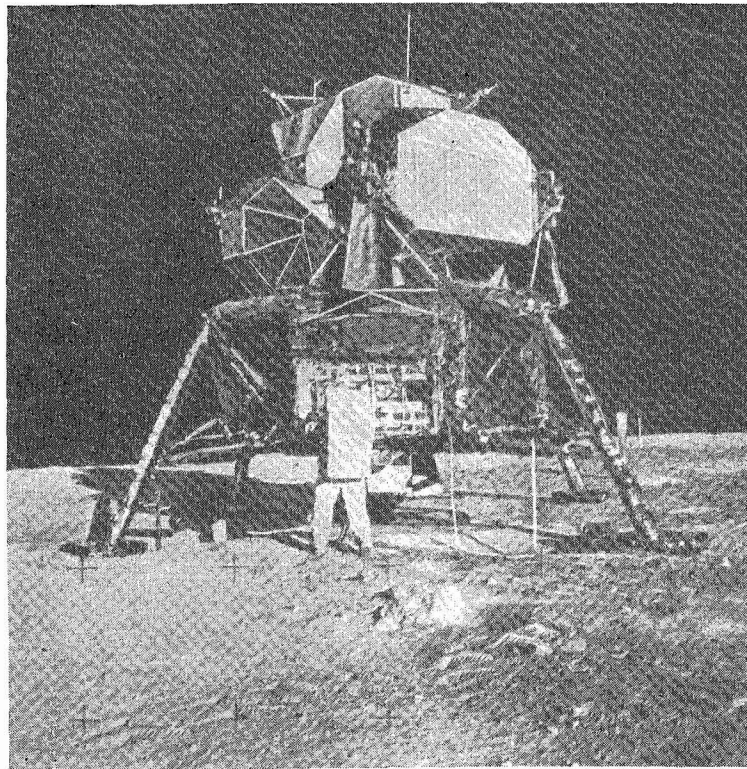
Лунная кабина предназначалась для доставки на Луну двух астронавтов, научного оборудования и транспортных средств и для отправки с Луны астронавтов и собранных ими образцов лунных пород на селеноцентрическую орбиту, откуда основной блок корабля «Аполлон» доставлял их к Земле (рис. 29).

Посадочная и взлетная ступени лунной кабины имели общую поминальную 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 опора 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 1,48 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

Рис. 29. Лунная кабина корабля «Аполлон-11» на Луне



была расположена на 0,46 м выше опор и могла вступить в контакт с поверхностью. В связи с этим насадка двигателя была сделана из легко разрушающегося материала.

В процессе посадки струя двигателя касалась поверхности грунта и вызывала эрозию, поднимала облака пыли и отбрасывала крупные обломки на значительное расстояние. Тяга двигателя регулировалась в пределах от 476 до 4467 кг. 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, регистрируемого сейсмографами. Масса взлетной ступени составляла без топлива 2,2 т, а энергия ее удара о поверхность эквивалентна энергии взрыва заряда тротила — около 2 т. Для удара по поверхности Луны в нескольких случаях использовалась 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, -15, -16 и -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, -16 и -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 9 кг, грузоподъемность 64 кг. Шины из полиэфирного корда имели наружный диаметр 398,8 мм и ширину 96,5 мм, камеры наполнены газом под давлением до 0,07—0,14 кг/см². Тележку можно катить по поверхности с наклоном до 20°.

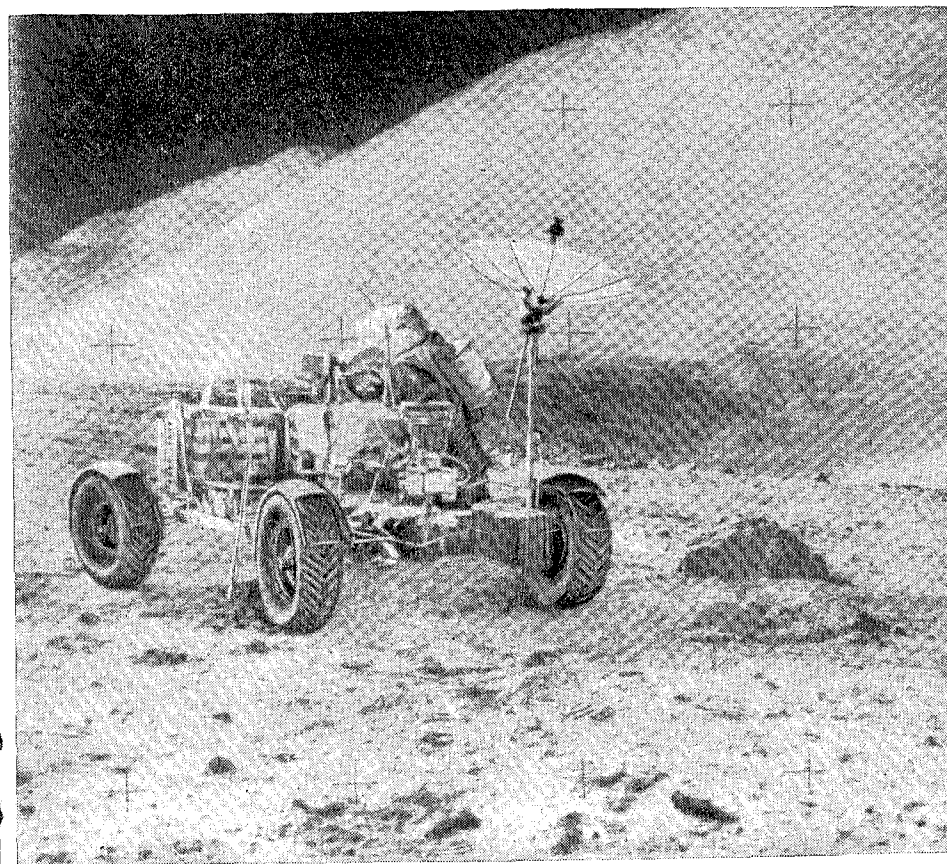
Луноход представлял собой четырехколесный электрический самоходный экипаж, рассчитанный на перевозку двух астронавтов, средств связи и навигации, научного оборудования и образцов лунных пород (рис. 30). Собственный вес лунохода на Земле 211 кг, вес брутто с астронавтами и грузом 690 кг. Длина машины 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 сплетен из металлической проволоки и имел титановые ограничители прогиба. К ободу прикреплены грунтозацепы из титанового сплава. Каждое колесо имело индивидуальный электропривод мощностью 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, радиоизотопная энергетическая установка для обеспечения их длительной работы, буровые инструменты и грунтоносы, а также ручной инструмент, используемый астронавтами при геологических исследованиях (рис. 31).

С точки зрения механики грунтов и грунтоведения, наибольший интерес представляет буровое и геологическое снаряжение, а также фотооборудование для крупномасштабных снимков поверхности грунта. В комплект инструментов, которыми пользо-

Рис. 30. Луноход экспедиции «Аполлон-15» на Луне



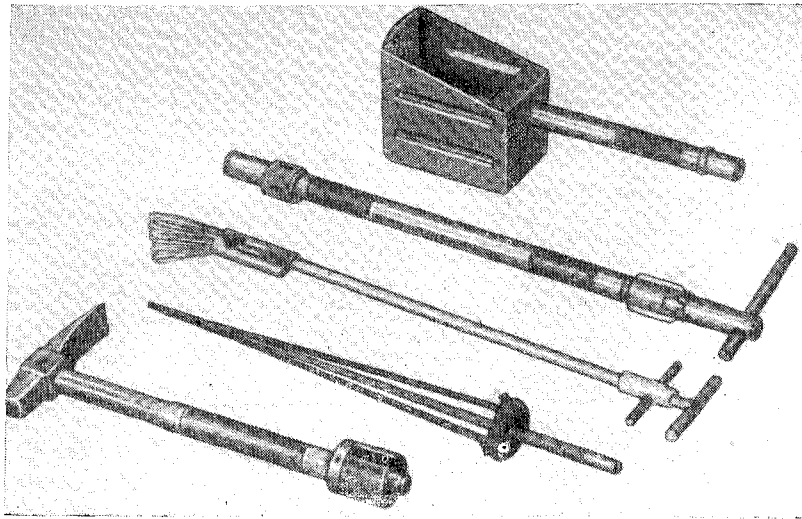


Рис. 31. Комплект геологических инструментов экспедиции «Аполлон»

вались астронавты для геологических исследований, входили: лопатка, решетчатый совок, решетчатый захват, геологический молоток и удлинительная ручка к ним, а также грунтоносы для отбора образцов грунта и их герметизации, щетка для очистки образцов, объединенная 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 380 мм 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 образцы крупностью от 10 до 63 мм, которые трудно взять рукой в перчатке. Длина его 610 мм. Длина удлинительной рукоятки 610 мм, диаметр 25 мм. 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 оборотов в минуту, и

наносить удары по забой скважины (2270 ударов в минуту). 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 2,5 кгМ, который должен был быть воспринят астронавтом. Вес бура на Луне составлял 1,96 кг, 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 расстояния с разрешением до 40 мкм. Размер кадра 24×24 мм охватывал на поверхности грунта участок размерами 76×76 мм.

В экспедиции «Аполлон-14» был использован простой ручной пенетромтр — алюминиевый анкерочный штырь для научного оборудования. Длина его 680 мм, 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 пенетромтр с самописцем, который вычерчивал кривую зависимости глубины погружения от нагрузки. Этот пенетромтр 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. Пользуясь методами сейсморазведки, с помощью этого оборудования можно было получить данные о строении грунтового разреза на значительную глубину. Для этой же цели предназначалась радиоаппаратура, при помощи которой осуществлялись просвечивание верхней толщи грунта и определение параметров преломленных волн.

ДОНЕСЕНИЯ АСТРОНАВТОВ

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 представили их непосредственные впечатления от лунного грунта, визуальная оценка его свойств и наблюдения при погружении в грунт грунтоносов, укреплении флажштока, движении по горизонтальным и наклонным участкам, преодолении рыхлых валов, окружающих кратеры.

Экипаж «Аполлона-11» высадился на плоской равнине, усеянной многочисленными мелкими кратерами. На поверхности лежало много камней, комков и обломков скал крупностью до 800 мм. Верхние сантиметры грунта состояли 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 грунто-вые частицы летели в одном направлении, с одинаковыми скоростями на одинаковые расстояния. Передвигаться по поверхности Луны было легче, чем в наземных тренажерах, имитировавших лунную гравитацию. Астронавты пробовали разные способы передвижения, в том числе и прыжки с сомкнутыми ногами. Лучшим способом была признана обычная ходьба, при которой надо было все время наклоняться вперед вследствие неуравновешенности рацда 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 топкого слоя зернистого грунта на поверхности скалы также возникала опасность скольжения.

По наблюдениям астронавтов, при забивке грунтоносов и установке флажштока грунт до глубины 100—120 мм был рыхлым, но глубже был более плотным, и флажшток удалось внедрить не более чем на 150—200 мм. Грунтоносы были забиты геологическим молотком на глубину 200—230 мм. 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 взбултривание 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 ковшем было замечено, что грунт сохраняет острые кромки и может держать вертикальные откосы высотой более 100 мм. Внутри ковша грунт крошится, не образуя комков.

Средняя глубина следа астронавта (рис. 32) была около 12,5 мм. Наибольшая (150—200 мм) была отмечена при ходьбе по рыхлому грунту, из которого состоят валы кратеров. Глубина погружения опор лунной кабины (рис. 33) при статическом давлении от 0,056 до 0,141 кГ/см² составляла от 25 до 75 мм.

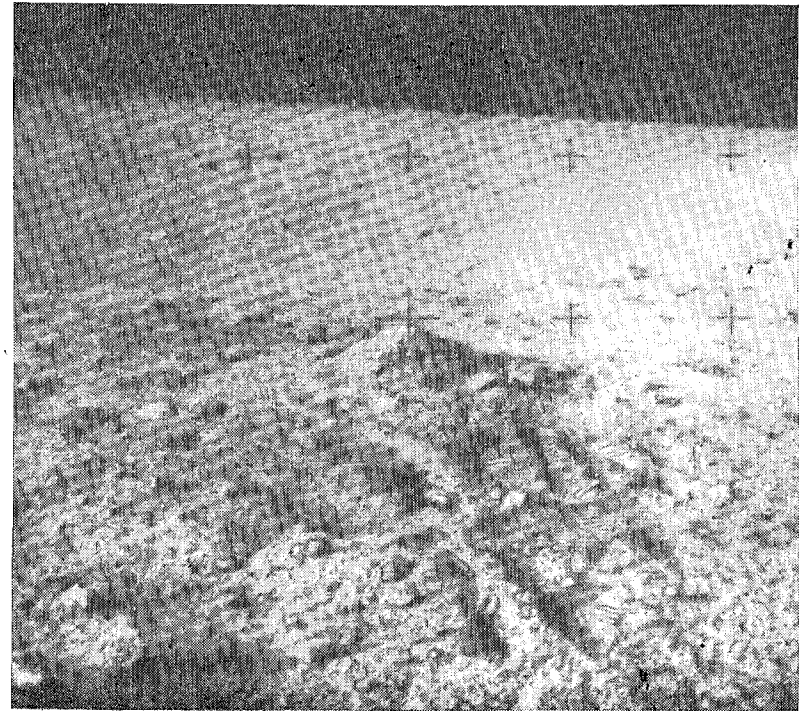
По наблюдениям астронавтов, сверху лежит слой серой пыли толщиной около 3 мм, дальше идет как бы спекшаяся корочка толщиной около 6 мм, которая растрескивается на расстоянии до

125—150 мм от места приложения внешней нагрузки. Ниже лежит 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 «Аполлон-12» была доставлена примерно в 1,5 тыс. км от места посадки «Аполлон-11». Это типично морской район Луны, сходный по своему характеру с районом, где работала предыдущая экспедиция. Посадка была осуществлена в 300 м от аппарата «Сервейер-3», который совершил посадку на 2,5 года раньше. Одно из заданий астронавтам состояло в розыске аппарата «Сервейер», 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,

Рис. 32. Следы астронавтов на лунном грунте



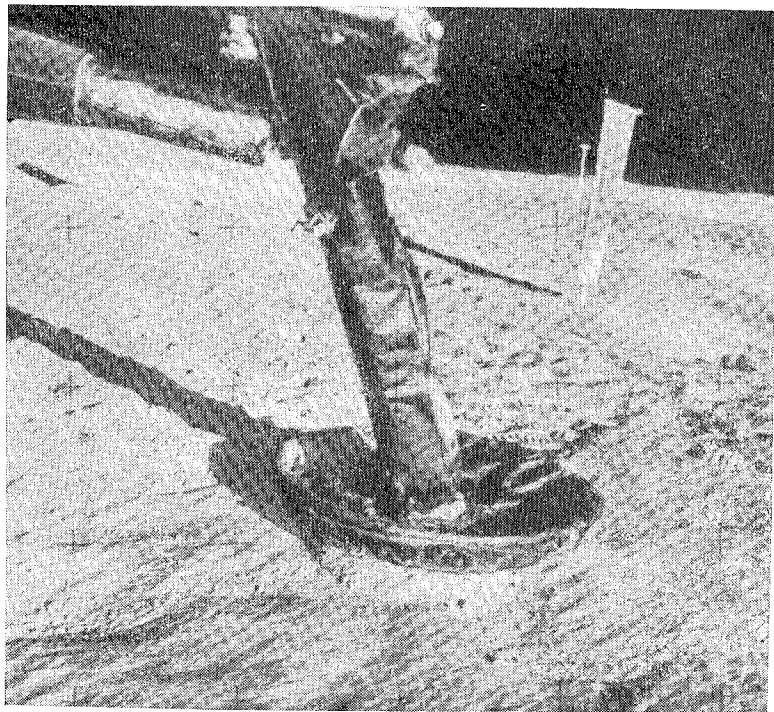
угловатой и округленной формы. Большинство из них частично углублено в слой зернистого грунта, в общем похожего на грунт в Море Спокойствия.

По оценке астронавтов, глубина пылеватого слоя была значительно больше, чем в районе посадки «Аполлона-11». Ноги местами 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 $0,35 \text{ кг/см}^2$ в течение нескольких дней пыль отстала от поверхности предметов.

Разработка грунта совком и отбор проб не представляли затруднений. Глубина внедрения флажника составила около 17 см. Грунтонос был без затруднений погружен на глубину 35 см, а

Рис. 33. Опора лунной кабины корабля «Аполлон-12» на лунной поверхности



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 ним наблюдалось взбугривание поверхности. На ровных участках глубина следа была около 1 см, на валах и склонах малых свежих кратеров значительно больше — 5—8 см.

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

Астронавты выкопали траншею глубиной 20 см с вертикальными стенками. Глубина траншеи ограничивалась только длиной рукоятки совка и могла бы быть значительно больше. Грунтонос, погруженный в дно траншеи, был легко опущен на 35 см. Грунт не вызывал 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 получаются 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. 34).

Большой интерес представляет посещение членами экспедиции «Аполлон-12» места посадки АЛС «Сервейер-3».

Профессор Р. Ф. Скотт рассказывает: «Во время первой экспедиции на Луну «Аполлон-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 прилунения аппарата «Сервейер-3» в апреле 1967 года. 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 кипокадры, снятые в ходе прилунения.

Семь лет назад я предложил специальный механизм — манипулятор для аппаратов «Сервейер» — для изучения механических

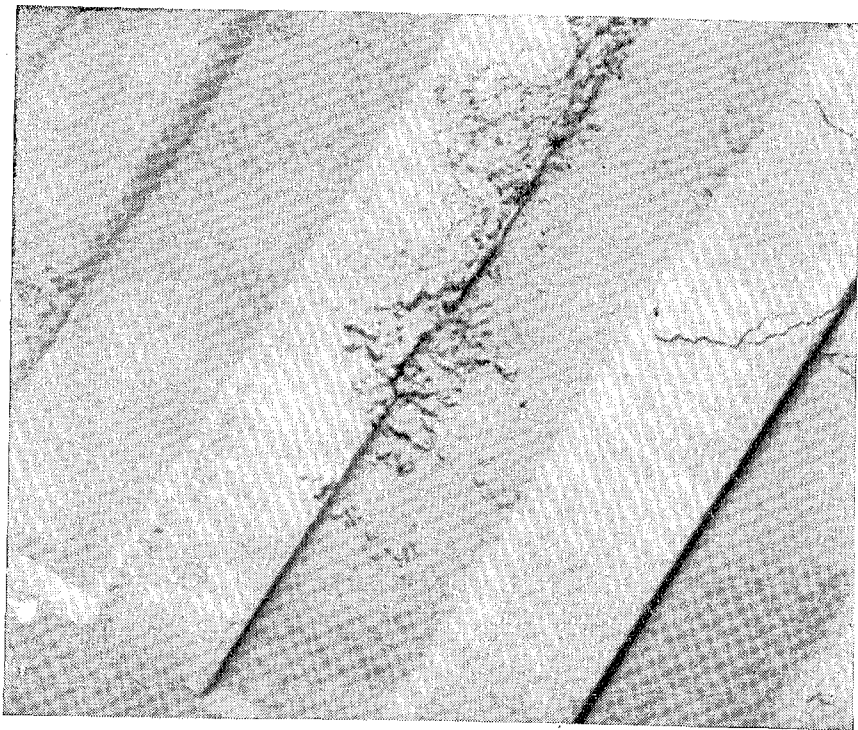
свойств лунных грунтов и участвовал в проведении экспериментов с ним на аппаратах «Сервейер-3 и -7».

Когда истек первый лунный день работы «Сервейера-3», не помню уже 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 аппарата «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 сталь-

Рис. 34. След астронавта крупным планом



ную 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 ковшом вернулось всего 6,5 г.

Когда мешок был вскрыт, в воздухе распространился характерный запах лунной пыли. Армстронг и Олдрин характеризовали его как запах гари или запах отстрелянных пистонов. Я считаю 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».

Экспедиция «Аполлон-14» высадилась 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, напоминающая порошок талька, окрашенный в коричневый 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 траншейки.

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 Аппенинских гор, у подножья 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 высадки первых экспедиций. На склонах 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 вытащить с большим трудом.

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

Экспедиция «Аполлон-16» исследовала район плоскогорья у кратера Декарт. Астронавты использовали луноход и усовершенствованные скафандры, обеспечившие 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 6 км/час. 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.

Экспедиция «Аполлон-17» высадилась у гор Тавр, в районе кратера Литтроу. Местность была густо покрыта кратерами мелких размеров. Местами встречался очень рыхлый грунт, в котором следы астронавтов достигали глубины 20 см. При поездке на луноходе очень мешала пыль, от ее абразивного действия стерся слой резины на рукоятке геологического молотка и начали протираться перчатки. В этой экспедиции впервые участвовал ученый геолог.

ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕГОЛИТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ, ПРОВЕДЕННЫХ АСТРОНАВТАМИ

След ботинка астронавта был длиной 33 см, шириной 14 см и площадью 410 см². При весе астронавта на Луне вместе со снаряжением 29,2 кг среднее давление под подошвой равно 0,07 кг/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 экспедиции «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 $E_0 = 1,35$ кг/см², а при глубине в 10 см $E_0 = 0,13$ кг/см².

Средний диаметр следа опоры корабля «Аполлон» составил 63 см, а статическая нагрузка на опору 270 кг. Глубина вдавливания опор изменялась от 2,5 до 7,5 см, что приводит к значениям модуля общей деформации в пределах 0,55—1,65 кг/см². Статическая несущая способность при таких глубинах составила около 0,09 кг/см².

Астронавты экспедиции «Аполлон-14» использовали ручную тележку, вес которой на Луне в зависимости от нагрузки изменялся от 8,7 до 12,7 кг. Глубина колея 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 пénéтрации грунта с помощью специально приспособленного анкерочного 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 7 до 13 кг, а двумя — до 22 кг.

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 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% от 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:

$$c \approx 0,0034 - 0,0060 \text{ кг/см}^2 \text{ и } \varphi \approx 35 - 36^\circ.$$

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

Таблица 8

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

Тип поверхности	Коэффициент пористости ϵ	Объемный вес γ , Г/см^3 (при $\gamma_{\text{уд}} = 3,1 \text{ Г/см}^3$)	Угол внутреннего трения φ
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—44,0
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. Объемный вес вычислен, исходя из удельного веса базальта $\gamma_{\text{уд}} = 3,1 \text{ Г/см}^3$; более точными будут значения, исходящие из удельного веса, определенного на образцах, доставленных «Аполлоном-14», $\gamma_{\text{уд}} = 2,95 \text{ Г/см}^3$, т. е. на 5% ниже. Значения углов внутреннего трения, полученные косвенным путем, представляются также завышенными.

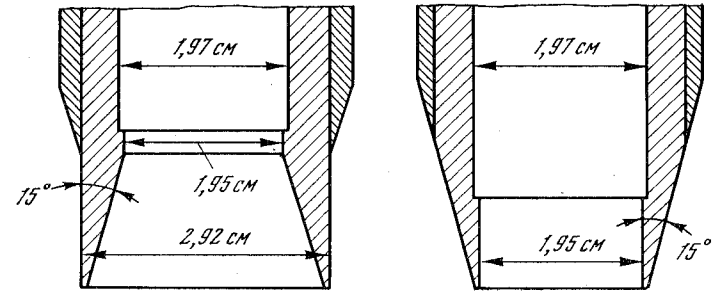


Рис. 35. Схемы нижней части трубчатых грунтоносов кораблей «Аполлон-11» (слева) и «Аполлон-12» (справа)

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. 8.

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

На рис. 35 представлены сечения наконечников грунтоносов «Аполлона-11 и -12».

Форма наконечника «Аполлона-11» представляет явно неудовлетворительную. Его внутреннее сечение на входе имеет площадь $6,7 \text{ см}^2$, а при переходе к цилиндрической части всего $3,0 \text{ см}^2$. Вследствие этого очень пористый грунт таким грунтоносом может быть уплотнен почти вдвое, а плотный грунт разрушен. 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. В 1949 г. Хворслев показал, что нарушение естественной плотности образца, отбираемого грунтоносом с толстыми стенками, зависит от соотношения между его наружным и внутренним диаметрами. И с этой точки зрения грунтонос «Аполлона-12» является также неудовлетворительным.

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

Грунтонос «Аполлона-15» имел внутренний диаметр 4,13 см и наружный 4,39 см. Электробур имел внутренний диаметр 2,04 см. В пробах, взятых грунтоносами этой экспедиции, отмечается большая разница плотности по высоте образцов.

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

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУННЫХ ГРУНТОВ В ЗЕМНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И СОСТАВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В земных лабораториях исследовались образцы лунных грунтов, доставленные советскими автоматическими станциями «Луна-16 и -20» и экспедициями «Аполлон», а также их земные аналоги. Для определения физико-механических свойств брались весьма ограниченные количества лунного вещества, поэтому определения приходилось вести на специально изготовленных миниатюрных приборах или ограничиваться примитивными пенетрационными экспериментами для первоначальной оценки.

К моменту окончания работы над этой книгой в литературе, доступной авторам, были опубликованы только три серии опытов, проведенных с образцами весом 20 и 200 г. Большинство же экспериментов выполнялось на образцах весом 1—2 г. В связи с этим, несмотря на попытки учета масштабных факторов, результаты определения механических свойств следует рассматривать как предварительные.

Несколько лучше обстоит дело с определением гранулометрического состава и значительно лучше с определением химического и минералогического состава, поскольку для этих анализов существуют надежные методы, не требующие больших образцов.

Что касается химического и минералогического состава, то мы ограничимся самыми краткими сведениями, поскольку лабораторные исследования на Земле в общем подтвердили ранее сделанный вывод о базальтовом составе горных пород лунных морей и анортозитовым — горных районов. Этого достаточно для обсуждения интересующих нас механических свойств лунного грунта.

На Земле были выполнены определения плотности образцов при различных методах их укладки, сопротивления пенетрации, сжимаемости и сопротивления сдвигу.

На данной стадии исследований, проводившихся в разных странах, в разное время, на разном оборудовании, не могло быть и речи о единой методике экспериментов. Тем не менее исследователи стремились проводить опыты в вакууме или в атмосфере нейтральных газов (во избежание изменения физико-химических свойств поверхности соприкасающихся зерен) большей частью при нормальной температуре $+20^{\circ}\text{C}$. Для контроля и сравнения

проводились аналогичные опыты с рядом земных аналогов, которые испытывались также и в нормальных атмосферных условиях.

Лабораторные исследования в области механики лунных грунтов проводились в СССР В. В. Громовым, В. В. Маркачевым, А. А. Силиным, Ю. А. Сурковым, К. П. Флоренским и другими учеными при участии авторов книги под руководством академика А. П. Виноградова; в США аналогичные работы проводили Л. Д. Джаффе, В. Д. Каррьер, Д. К. Митчел, Р. Ф. Скотт и другие.

СОВЕТСКИЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛУННЫХ ГРУНТОВ И ИХ ЗЕМНЫХ АНАЛОГОВ

Прием и вскрытие контейнеров с лунным грунтом, доставленных на Землю станциями «Луна-16 и -20», проводились в Центральной приемной лаборатории АН СССР. Исследования их механических свойств велись в приемной камере, герметичном боксе и универсальной испытательной установке ТОР-1.

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

Основными ее элементами являются рабочая камера, плюзовое 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 в рабочей камере 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. 36) спроектирована применительно к следующему порядку работы. Контейнер с веществом вводится через плюзовое 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. столба.

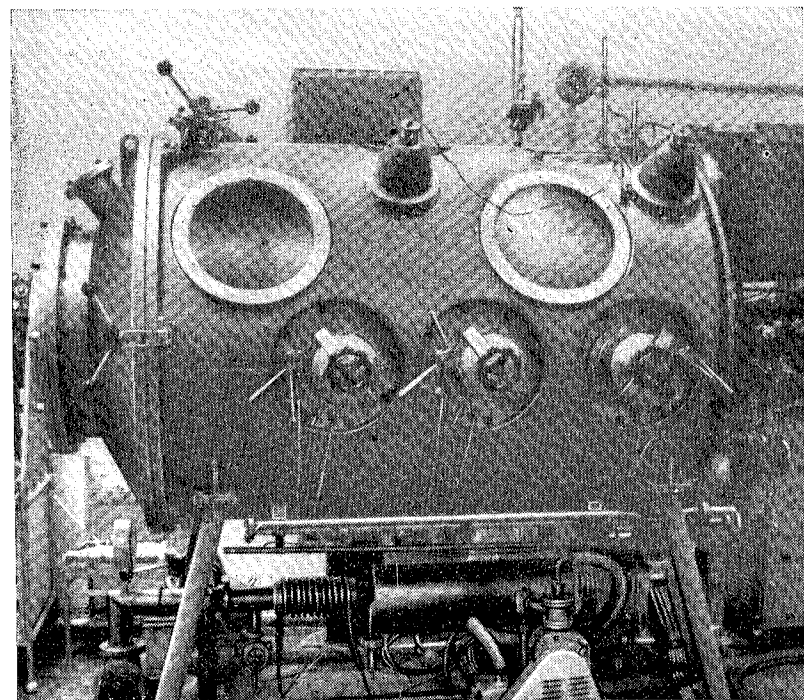
Работа в камере ведется оператором с помощью трех перечисленных устройств, смонтированных на цилиндрической части камеры. Работа перчатками возможна лишь тогда, когда камера заполнена газом до атмосферного давления.

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 могут присутствовать в газах, содержащихся в лунном грунте. Рабочая температура термостерилизатора 800° С.

Для высоковакуумной откачки на установке применены турбомолекулярные и магниторазрядные насосы. Предельное давление, достигаемое в камере, $2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. столба.

Лунный грунт находился в буровом снаряде, который представляет собой пустотелую трубу с винтовой нарезкой и резами на торце. Буровой снаряд заключен в герметичный контейнер.

Рис. 36. Внешний вид приемной камеры



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. 37). 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.

Герметичный исследовательский бокс представляет собой вертикальный цилиндр из органического стекла, заполняемый азотом при атмосферном давлении (рис. 38). 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 исследовательском боксе постоянно поддерживается небольшое избыточное давление азота, что предотвращает возможность протекания 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 были получены оптические характеристики грунта.

Исследования механических свойств лунного грунта в герметичном боксе были 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, микропе-

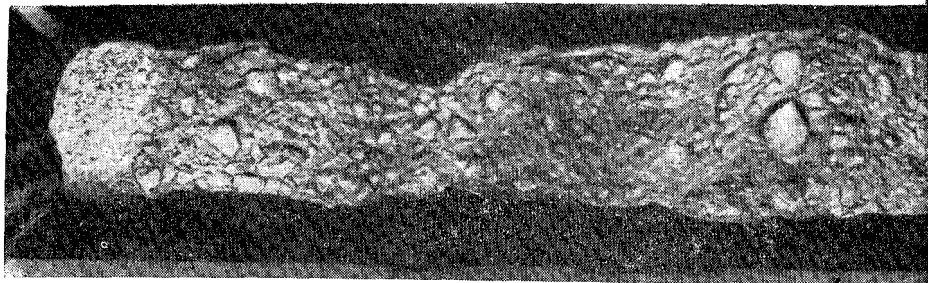


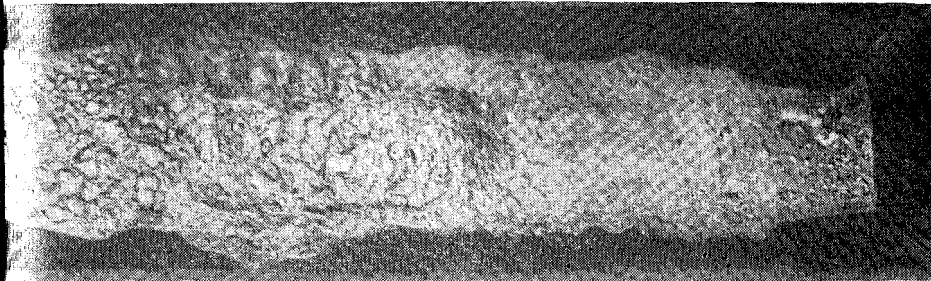
Рис. 37. Лупный грунт, доставленный станцией «Луна-16», в лотке приемной камеры

нетрометр для определения песучей способности и прибор, с помощью которого изучался характер деформации грунта.

Сдвиговый прибор (рис. 39) относится к классу приборов одноплоскостного среза с фиксированной поверхностью сдвига. В этом приборе испытываются образцы диаметром 25,2 мм и высотой 9–12 мм. Микропенетромтр (рис. 40) позволяет опреде-



Рис. 38. Внешний вид герметичного исследовательского бокса приемной лаборатории



лить сопротивление вдавливанию в грунт инденторов различной формы. В приборе для изучения характера деформации сдвига имеется подвижная перегородка, передвигаемая которую, можно визуально наблюдать через прозрачные стенки прибора деформацию грунта при вышпирании и обрушении.

Универсальная испытательная установка TOP-1 (рис. 41) представляет собой вакуум-камеру, внутри которой размещен комплекс механизмов с измерительными узлами, предназначенными для различных исследований лунного грунта и его аналогов.

Измерительные механизмы TOP-1 (рис. 42) 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 TOP-1 позволяет проводить испытания только с весьма малыми пробами зернистого грунта и твердой горной породы, так как из условий обеспечения вакуума в камере масса образцов грунта не может превышать 2–5 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 TOP-1 можно проводить испытания в атмосфере воздуха при нормальном давлении, в атмосфере стерилизованного гелия высокой чистоты и в вакууме глубиной до 10^{-5} мм рт. столба. 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 откачке камеры до вакуума $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. столба и заполнении ее гелием. При

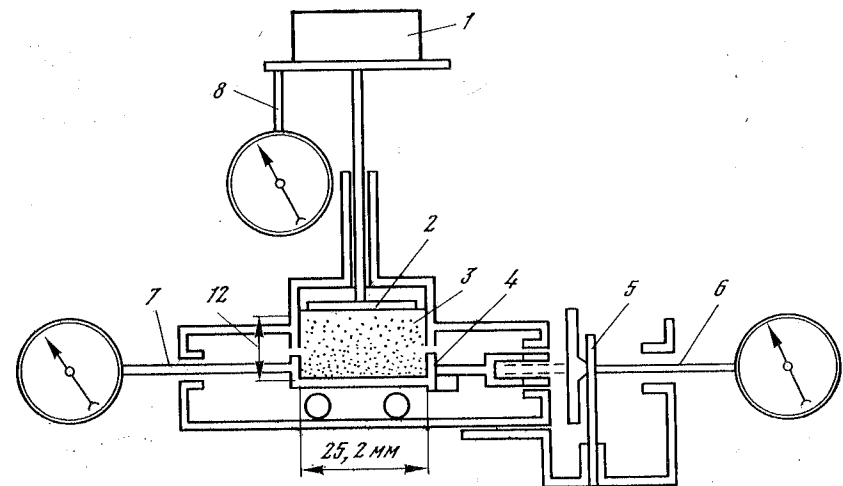


Рис. 39. Схема сдвигового прибора:

1 — нагрузка, 2 — штамп, передающий нормальную нагрузку, 3 — образец грунта, 4 — подвижная каретка, 5 — упругая балка, 6 — индикатор сдвига, 7 — индикатор горизонтальной деформации, 8 — индикатор вертикальной деформации

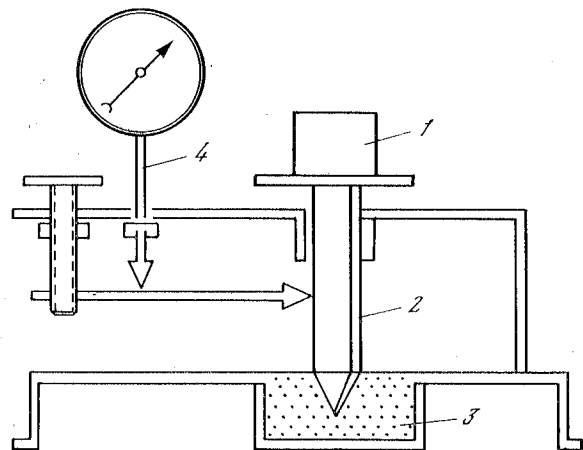


Рис. 40. Схема микропенетromетра:

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

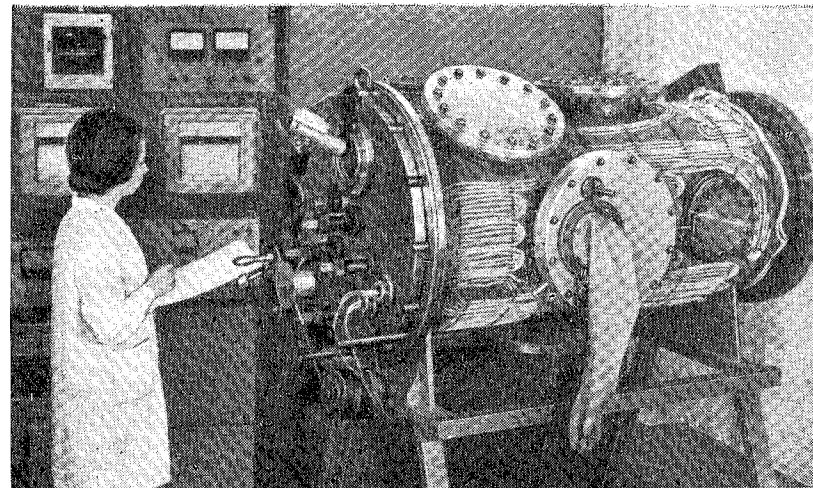


Рис. 41. Общий вид высоковакуумной испытательной установки TOP-1

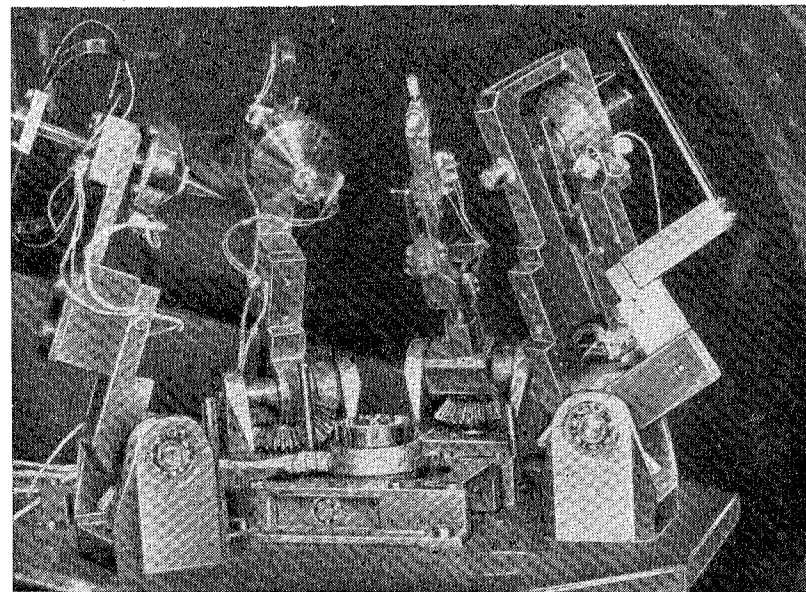


Рис. 42. Измерительные узлы установки TOP-1

проведении опытов в вакууме откачка достигала $(2-5) \cdot 10^{-5}$ мм рт. столба. В опытах с подогревом образец подогревали до начала откачки, чтобы удалить влагу.

Лунный грунт на испытания поступал в герметическом контейнере, где он находился в атмосфере чистого гелия. Аналоги лунного грунта поступали в открытом виде. Вследствие этого в аналогах присутствовала гигроскопическая влага в количестве 1,5—3,0% по весу. При откачке TOP-1 эта влага испарялась, и последующие испытания в атмосфере гелия и 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 всучиванию под действием расширения газа в порах и парообразования за счет испарения гигроскопической влаги.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УЗЛЫ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ НА TOP-1

Образец грунта помещается в центральной части приборной плиты 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 устройствами 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.

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 служат (рис. 43) полированный конус 1 с углом при вершине, равным 30° . Конус весит 20 г. Внедрение конуса в поверхность образца 2, помещенного в чашечке 3, осуществляется под действием его собственного веса. Конус укреплён 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 нулевой отсчет. При дальнейшем медленном движении конус входит в контакт с грунтом. Посте-

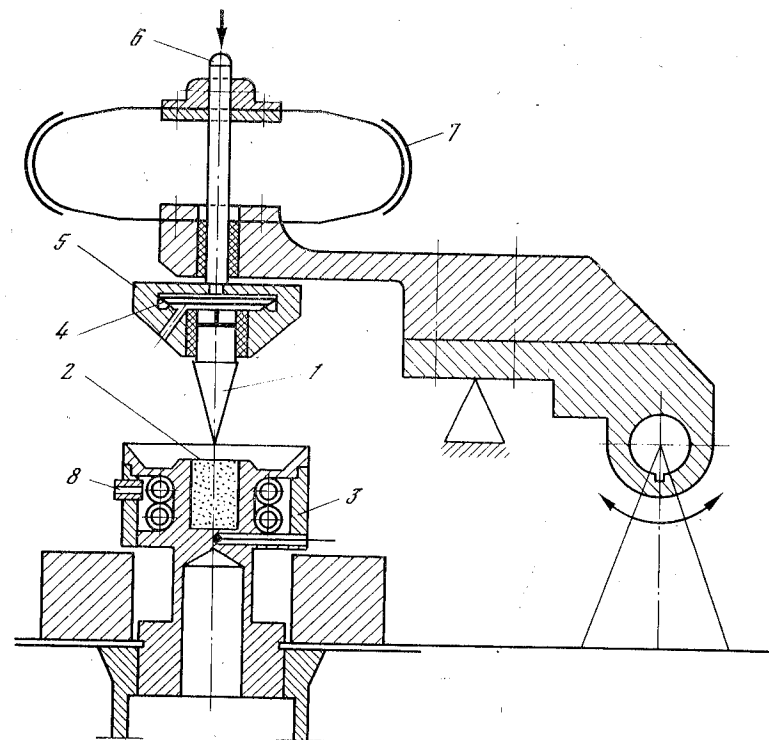


Рис. 43. Измерительный узел для проведения опытов с пенетрацией:
1 — полированный конус, 2 — образец грунта, 3 — чашечка, 4 — мембрана, 5 — головка, 6 — вертикальный шток, 7 — эллиптическая пружина, 8 — нагреватель

пенно 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. 44) 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 пружинной 6 с тензодатчи-

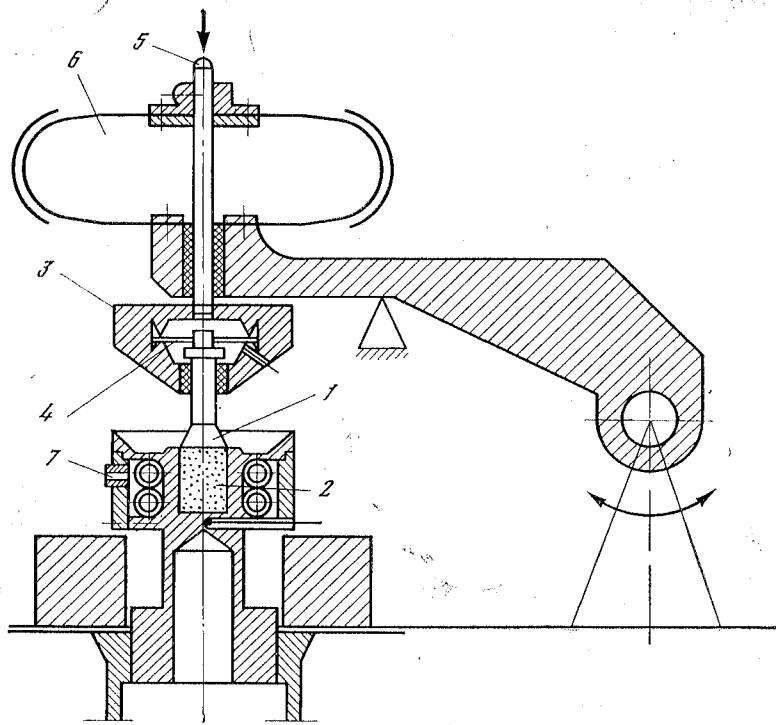


Рис. 44. Измерительный узел для компрессионных испытаний:

1 — полированный поршень, 2 — образец грунта, 3 — головка, 4 — мембрана, 5 — вертикальный шток, 6 — эллиптическая пружина, 7 — нагреватель.

ками типа ФКП. Образец может быть подогрет нагревателем 7. Вертикальное давление на грунт может изменяться от 0 до 1,5 кг/см², глубина погружения поршня — от 0 до 0,8 см.

Узел вращательного сдвига (рис. 45) 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 приводит во вращательное движение вокруг вертикальной оси и увлекает за собой ребристый диск с его штоком. На штоке закреплен рычаг 9 с упором, касающимся измерительной тензодаттической балки 10. Тензодатчики ФКП, наклеенные на балку, измеряют силу давления рычага. В процессе опыта эта сила

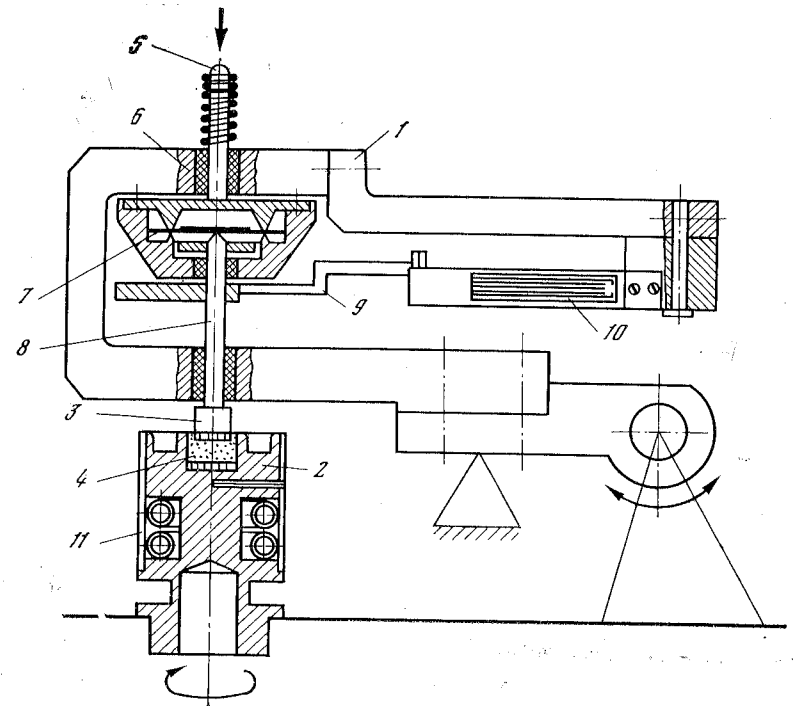


Рис. 45. Узел вращательного сдвига:

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 — тензодаттическая балка

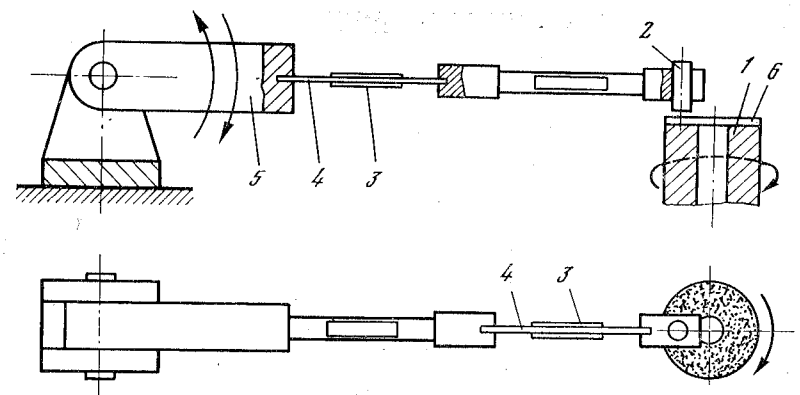


Рис. 46. Измерительный узел для определения фрикционных свойств:

1 — держатель образца, 2 — держатель контрола, 3 — тензодатчики, 4 — тензодаттическая балка, 5 — держатель тензобалки, 6 — образец грунта

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 0,6 кГ/см², предельный крутящий момент — от 0 до 0,150 кГ·см. Чашечка прибора оборудована нагревателем 17.

Сигналы тензометрических датчиков для измерения усилий и деформаций поступают на усилитель АНЧ-7М и далее на самописцы ПС-1. В результате каждого опыта получали две диаграммы зависимости усилия и деформации от времени, которые расшифровывались с помощью заранее составленных тарифовочных таблиц. Точность измерения в среднем составляла около 10% от предельных значений 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 0,5 мин., на компрессию — 10 мин. и на вращательный сдвиг — 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 поступал в контейнере 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, грунты-аналоги испытывались во всех трех условиях: в нормальной атмосфере, атмосфере гелия и вакууме 10⁻⁵ мм рт. столба при температуре 20 и 140° С.

На установке ТОР-1 (рис. 46) 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 контроля были использованы образцы металлических и неметаллических материалов, применяемых в космической технике.

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 оксидной смолы, напылялось исследуемое вещество, в нашем случае это был лунный грунт или два его земных аналога: андезито-базальтовый песок и молотый базальт.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ, ДОСТАВЛЕННЫХ «ЛУНОЙ-16 И -20»

Общая характеристика лунного реголита и форма зерен

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

Колонка реголита, отобранного станцией «Луна-16», целиком заполнила буровую трубу. Заметного перемешивания материала при транспортировке не отмечалось. Помещенный на лотке приемной камеры образец реголита не имел видимой слоистости и оказался однородным по всей высоте. Реголит в целом представлял рыхлый разнородный 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. 9).

Таблица 9
Химический состав *

Материал	Химические компоненты и их содержание, в % по весу							
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Лунный грунт «Луны-16»	41,90	3,36	15,33	16,66	8,78	12,53	0,34	0,10
» » «Луны-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	—	—

* Состав лунного грунта приводится по данным книги: «Лунный грунт из Моря Изобилия» (под ред. А. П. Виноградова. М., 1973), составы других материалов — по данным МИИТ.

Реголит легко слипается в отдельные рыхлые комки и легко формируется. 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 ними поверхностям твердых тел.

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

По А. П. Виноградову, 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, несут 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 металлические частицы. На поверхности некоторых частиц обнаружено даже пержавеющее 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 минералы. Окатанных и оплавленных микробрекчий и сфероидов наблюдалось мало. В то же время вместо базальта значительную долю частиц составляли апортозиты и их разновидности — породы также основного состава, но богатые полевым шпатом (алюмосиликатом). Очень редки здесь частицы из базальта. Вместе с тем и здесь встречаются частицы металлического железа. Содержание никеля также выше в реголите, чем в кристаллических апортозитах.

Таким образом, по данным «Луны-16 и -20», лунные моря состоят из базальтовых пород, в то время как материя — из пород, содержащих апортозиты. Изучение образцов лунных апортозитов 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.

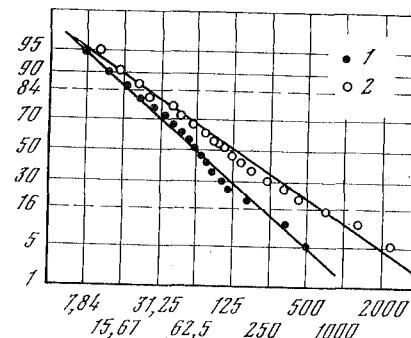
Большую роль в образовании реголита, как уже отмечалось, играют метеориты. По мнению А. П. Виноградова, удары микрометеоритов о поверхность Луны являются важным фактором глубокого разрыхления лунных пород. Однако такие удары не сглаживают морфологических и других особенностей морского и материкового 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.

Гранулометрический состав

Гранулометрическое исследование пробы лунного грунта, доставленного «Луной-16», проводилось Ю. И. Стахеевым, Е. К. Вульфсоном, А. В. Ивановым и К. П. Флоренским в две стадии. 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.

Рис. 47. Кривые гранулометрического состава пробы лунного грунта, доставленного станцией «Луна-16»:

по горизонтали — крупность частиц в мкм, по вертикали — суммарное содержание частиц диаметром крупнее заданного в процентах по весу; 1 — верхняя зона, 2 — нижняя зона



Гранулометрические характеристики фракций с размерами частиц менее 83 мкм измеряли 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. 47 представлены гранулометрические характеристики исследованных проб в координатах логарифмов размера частиц — суммарная масса частиц, в процентах размером больше данного.

Средний размер частиц увеличивается с глубиной от 62 до 114 мкм. Размер самых крупных частиц 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.

Определение физико-механических свойств в герметичном боксе приемной лаборатории

Для этих исследований было выделено около 20 г грунта из средней части пробы, т. е. с глубины около 100 мм от поверхности Луны. Опытами руководил В. В. Громов.

Плотность грунта в рыхлом насыпном состоянии оказалась равной 1,115 г/см³, а после уплотнения вибрацией, ударами и трамбованием — 1,793 г/см³, чему соответствуют коэффициенты пористости 1,7 и 0,67.

Коэффициент сжимаемости грунта $a = \Delta \epsilon / \Delta p$ 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 , кг/см ²	0—0,1	0,1—0,2	0,2—0,3	0,3—0,4	0,4—0,5
Коэффициент сжимаемости a , см ² /кг	3,9	3,0	1,0	0,3	0,2

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 $\rho = 1,29$ г/см³ угол внутреннего трения равен 10—12°, при плотности $\rho = 1,51$ г/см³ он увеличивается до 22°, при $\rho = 1,6$ г/см³ доходит до 30°.

В результате опытов на сдвиг, проведенных разными методами, была построена обобщенная кривая сдвига, представленная на рис. 48. Ее криволинейный начальный участок соответствует дан-

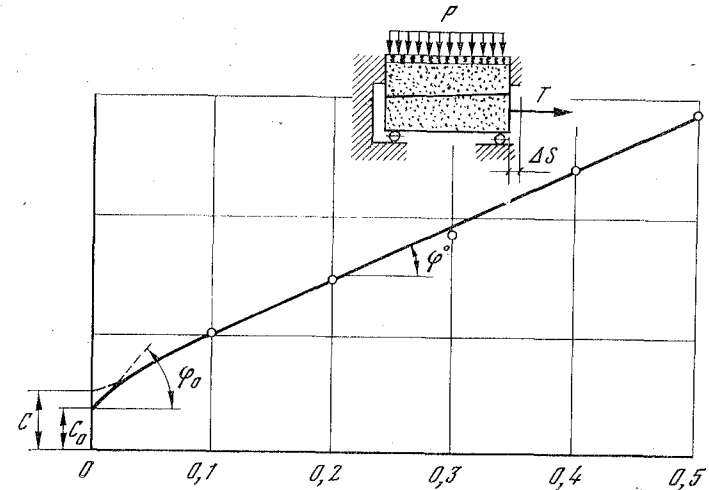


Рис. 48. Кривая сопротивления сдвигу по испытаниям лунного грунта, доставленного станцией «Луна-16» в исследовательском боксе в среде азота: по горизонтали — вертикальная нагрузка σ в кг/см², по вертикали — сопротивление сдвигу τ в кг/см²

ным, полученным при выширании призмы грунта вверх под действием бокового давления в отсутствие вертикальной нагрузки.

Опыты с пенетрацией грунта конусным штампом весом 32 г с углом при вершине 30° показали, что при плотности менее $\rho = 1,5$ г/см³ конус проваливается на глубину более 12 мм и несущая способность ничтожно мала. При плотности $\rho = 1,75$ г/см³ удельное сопротивление пенетрации составляло $R_n = 1,65$ кг/см².

Опыты с вдавливанием круглого плоского штампа диаметром 8 мм показали, что при рыхлом насыпном состоянии ($\rho = 1,12$ г/см³) штамп погружается без выширания грунта в стороны, с образованием кольцевых трещин. В плотном грунте погружение штампа намного уменьшается и вокруг него появляются зоны выширания с кольцевыми и радиальными трещинами. В ходе этих опытов были 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 , кг/см ²	0,15	0,29	0,85	2,4

Из образца, доставленного «Луной-20», было также отобрано 20 г из верхнего слоя глубиной до 100 мм в естественном залегании. От образца «Луны-16» он отличался своим светло-серым цветом и более мелкозернистым составом.

Плотность грунта в рыхлом насыпном состоянии равна 1,04 г/см³, а после уплотнения виброударным методом —

1,798 г/см³, 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 грунта «Луны-20» проводились на тех же приборах, что и «Луны-16». Как показали опыты, компрессионная кривая для «Луны-20» практически совпадает с кривой для «Луны-16», т. е. сжимаемость обоих грунтов при одинаковых коэффициентах пористости оказалась одинаковой.

Однако 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 кГ/см².

В диапазоне сжимающих напряжений от 0 до 0,4 кГ/см² 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 слившимися зернами. Эти агрегаты отличаются малой прочностью и образуют слабую структуру рыхло насыпанного образца. После приложения сжимающей нагрузки происходят два процесса: в первую очередь наблюдаются сближение агрегатов и значительное уменьшение общей пористости грунта, во вторую — происходит разрушение слабых агрегатов и сближение отдельных зерен, которое также ведет к уменьшению пористости, но уже в меньшем масштабе. По мнению В. В. Громова, в диапазоне сжимающих напряжений от 0,5 до 1,0 кГ/см² уплотнение грунта происходит за счет разрушения агрегатов в местах их контактов. Два механизма деформации, описанные выше, отражаются двумя слагаемыми правой части формулы.

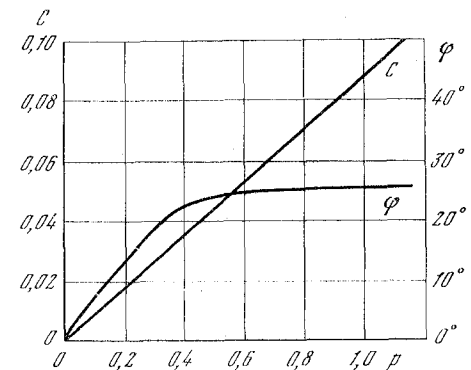
Используя большой образец грунта «Луны-20», который был представлен для его опытов, тот же исследователь провел весьма интересные наблюдения за деформацией прямоугольной призмы грунта, насыпанной в сосуд с прозрачными стенками при горизонтальном перемещении одной из вертикальных стенок в зависимости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

Образец рыхлого грунта имел исходную плотность 1,04 Г/см³, сечение 30×10 мм и высоту 15 мм. После того как вертикальная стенка шириной 10 мм была смещена вперед на 11,5 мм, сечение образца уменьшилось до 18,5×10 мм, высота увеличилась до 19,5 мм, а плотность возросла до 1,3 г/см³.

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

Образец уплотненного грунта имел то же исходное сечение при

Рис. 49. Зависимость параметров сопротивления сдвигу для образца лунного грунта, доставленного «Луной-20», от уплотняющего давления:
 c — сцепление в кГ/см²,
 φ — угол внутреннего трения,
 p — давление при предварительном уплотнении в кГ/см²



плотности 1,6 г/см³. При незначительном горизонтальном смещении стенки образовалась четкая призма выщипания 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 от $p = 0$ до $p = 0,5$ кГ/см² наблюдается быстрый рост угла внутреннего трения и сцепления. Затем оба параметра стабилизируются. В интервале $p = 0,5—1,0$ кГ/см² $\varphi_{\text{средн}} = 25^\circ$ и $c_{\text{средн}} = 0,04$ кГ/см². При опытах с грунтом «Луны-20» были получены кривые зависимости φ и c от уплотняющего давления, представленные на рис. 49.

Определение механических свойств грунта, доставленного «Луной-16», на установке TOP-1

На TOP-1 были испытаны лунный грунт, доставленный «Луной-16», и два его земных аналога. Первый из них представлял собой андезит-базальтовый вулканический песок из пос. Ключи в Центральной Камчатке, второй — молотый базальт Берестовецкого месторождения УССР. В соответствии с классификацией грунтов СНиП-Б.1-62, принятой в СССР, оба аналога относятся к числу пылеватых песков.

Удельный вес минеральных зерен лунного грунта был принят равным $\gamma_{\text{уд}} = 3,2$ Г/см³, средний объемный вес по глубине погружения бура «Луна-16» $\gamma = 1,2$ Г/см³. Удельный вес минеральных зерен андезит-базальтового вулканического песка $\gamma_{\text{уд}} = 2,79$ Г/см³, удельный вес зерен молотого базальта $\gamma = 2,98$ Г/см³. 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. 10.

Таблица 10

Объемный вес лунного грунта и его аналогов

Состояние исследуемого материала	Объемный вес γ , Г/см ³		
	Лунный грунт	Андезито-базальтовый вулканический песок	Молотый базальт
Рыхлое насыпное	1,26	1,05	1,00
Уплотнен постукиванием 50 раз	1,90	1,41	1,58
Дополнительно уплотнен стержнем	1,90	1,46	1,73

В качестве общей характеристики прочности было принято удельное сопротивление пенетрации R_n (кГ/см²), в качестве параметров сопротивления сдвигу — угол внутреннего трения φ и сцепление c (кГ/см²), в качестве параметра, характеризующего деформируемость при сжатии, — коэффициент относительной сжимаемости a_0 (см²/кГ). Опыты проводились А. А. Силиным, В. В. Маркачевым, А. И. Ведениным и авторами книги.

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

$$R_n = k_d^n \frac{P}{\pi h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha / 2}, \text{ кГ/см}^2;$$

при $\alpha=30^\circ$, $R_n=4,44 \cdot k_d^n P/h^2$, кГ/см².

В опытах на ГОР-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

удельного сопротивления от нормального давления на образец

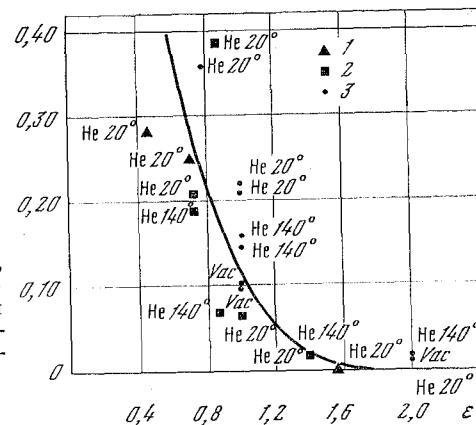
$$\tau_{\text{пред}} = 2 \frac{M_{\text{пред}}}{\pi r^3}, \text{ кГ/см}^2.$$

Угол внутреннего трения и сцепления определяется графоаналитическим путем по спрямленному графику зависимости пре-

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\tau - c}{\sigma} \right).$$

Рис. 50. Зависимость удельного сопротивления пенетрации от коэффициента пористости грунта ε и условий проведения опыта:

1 — лунный грунт;
2 — андезито-базальтовый вулканический песок,
3 — молотый базальт.
He 20° — гелий при нормальном давлении и температуре +20°,
He 140° — то же, при температуре +140°,
Vac — вакуум при температуре +140°; по вертикали — удельное сопротивление пенетрации R_n , кГ/см²



Коэффициент относительной сжимаемости a_0 (см²/кГ) 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

$$a_0 = k_d^k \frac{\Delta S_i}{H_i \Delta p_i}, \text{ см}^2/\text{кГ}.$$

В этих формулах приняты следующие обозначения: α — угол при вершине конуса пенетromетра; h — глубина погружения конуса в грунт (см); P_i — нагрузка на конус пенетromетра (кГ); $M_{\text{пред}}$ — предельный крутящий момент при вращательном сдвиге (кГ·см); r — радиус ребристого диска (см); σ — нормальное давление на образце (кГ/см²); Δp_i — приращение нормального давления на интервале опыта (кГ/см²); H_i — высота образца в начале интервала опыта (см); ΔS_i — уменьшение высоты образца на интервале опыта (см); k_d^k ; k_d^k — коэффициенты, учитывающие влияние боковых стенок цилиндра на значения пенетрации и компрессии; $\tau_{\text{пред}}$ — предельное сопротивление сдвигу, кГ/см².

Использование схемы вращательного сдвига было принято вследствие малого количества лунного грунта, выделенного для опытов на ГОР-1, при котором было невозможно применить обычные приборы одноплоскостного сдвига или трехосного сжатия, формула для $\tau_{\text{пред}}$ принята по данным А. Н. Зеленина и 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. Приведенные здесь данные получены по тем экспериментам, в которых не было обнаружено грубых ошибок.

Таблица 11

Коэффициент относительной сжимаемости α_0 (в см²/кГ) в различной атмосфере и вакууме для грунтов-аналогов *

Материалы и интервалы сжимающих напряжений, кГ/см ²	Условия проведения испытаний		
	Гелий 20° С	Гелий 135° С	Вакуум 10 ⁻⁵ мм рт. ст., 135° С
	Молотый базальт		
0—0,1	2,22	2,55	2,84
0,1—0,2	0,286	0,22	0,47
0,2—1,0	0,064	0,071	0,08
Андезито-базальтовый вулканический песок			
0—0,1	1,47	0,90	0,66
0,1—0,2	0,14	0,21	0,17
0,2—1,0	0,045	0,06	0,06

* Исходное состояние грунтов рыхлое насыщенное при коэффициентах пористости ϵ_0 : базальт 2,00, андезито-базальтовый песок 1,39.

По пенетрационным испытаниям были получены таблицы значений удельного сопротивления пенетрации для всех исследованных грунтов, по которым затем был составлен график, представленный на рис. 50, показывающий зависимость R_n от коэффициента пористости грунта ϵ .

По компрессионным испытаниям были построены кривые зависимости глубины погружения поршня от вертикального давления. В результате обработки этих кривых были найдены значения коэффициентов относительной сжимаемости для различных интервалов давлений, представленные в табл. 11.

По испытаниям на вращательный сдвиг были построены графики зависимости предельного сопротивления сдвигу от нормального давления. На основании этих графиков были получены значения углов внутреннего трения и сцепления, приведенные в табл. 12.

Результаты опытов в гелии при температуре плюс 20 и 140°С и в вакууме 10⁻⁵ мм рт. столба при 140°С показали, что главным фактором, определяющим удельное сопротивление пенетрации для всех исследованных материалов, является их коэффициент пористости. У рыхлых насыщенных грунтов удельное сопротивление пенетрации снижается до $R_n = 0,012$ кГ/см², у грунтов, уплотненных постукиванием и обжатием штампом, оно увеличивается до 0,357—0,383 кГ/см². По сравнению с влиянием пористости влияние среды и температуры в исследованных пределах оказалось второстепенным. Можно отметить, что у грунтов в рыхлом насыщенном состоянии сопротивление пенетрации в гелии при 140°С

Таблица 12

Параметры сопротивления сдвигу при разных условиях испытаний *

Материал	Условия проведения испытаний					
	Воздух 20° С		Вакуум 10 ⁻⁶ мм рт. ст., 20° С		Вакуум 10 ⁻⁶ мм рт. ст., 140° С	
	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c

Андезито-базальтовый вулканический песок	27°30'	0	25°30'	0,004	23°40'	0,004
Молотый базальт	30°30'	0	26°50'	0,036	27°00'	0,004

* Перед испытанием грунты уплотняли постукиванием и кратковременным приложением вертикального давления $\sigma = 0,55$ кГ/см².

оказалось несколько выше, чем при 20°, а в вакууме почти таким же, как в гелии. У уплотненных грунтов переход от 20 к 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 имели условия насыщения 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 температуре плюс 20°С. По этим кривым были вычислены значения α_0 .

Поскольку испытания лунного грунта в вакууме по ряду причин провести не удалось, были поставлены специальные опыты с аналогами в атмосфере гелия при температуре 20 и 140°С и вакууме 10⁻⁵ мм рт. столба при температуре 140°С для выяснения вопроса, насколько меняются свойства грунта при переходе от атмосферы гелия к вакууму. Результаты этих опытов представлены в табл. 11.

Анализ табл. 11 показывает, что лунный грунт в рыхлом насыщенном состоянии обладает чрезвычайно большой сжимаемостью, которая, однако, при первоначальном обжатии давлением в 0,2 кГ/см² снижается в несколько раз, хотя вплоть до конца опыта, при сжимающем напряжении 0,6—0,8 кГ/см², остается все еще большой, значительно превышающей сжимаемость распространенных на Земле песчаных грунтов в обычном для последних 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 насыщенном состоянии. Результаты испытаний говорят о том, что в указанных выше усло-

виях эти материалы как аналоги лунного грунта выбраны удачно и могут служить его заместителями в экспериментах, связанных со сжимаемостью.

На основании анализа табл. 11 можно отметить, что у обоих материалов при всех условиях испытаний на одинаковых интервалах нагружения коэффициенты сжимаемости имеют одинаковый порядок величин. На первом этапе происходит первоначальное обжатие и коэффициент относительной сжимаемости приобретает максимальные значения, затем он резко снижается и на последнем этапе доходит до значений $0,08 \text{ см}^2/\text{кг}$. Однако и эти последние цифры все еще значительно превышают обычные для земных пылеватых песков средней плотности значения $a_0 \approx 0,01 \text{ см}^2/\text{кг}$.

Влияние подогрева и вакуума на свойства образцов проявляется различно. У молотого базальта сжимаемость несколько возрастает на всех интервалах нагружения, что может быть связано с некоторым разуплотнением образцов при подогреве и откачке. У андезит-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. столба 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 компрессионной грунто-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. Было замечено, что оба аналога, высушенные до постоянного веса, интенсивно поглощают 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. 12 показывает, что в среднем лучший грунт и его аналоги имеют близкие параметры сопротивления сдвигу и характеризуются в данных условиях испытания низким сцеплением от 0 до $0,016 \text{ кг}/\text{см}^2$. Несколько неожиданными явились значения углов внутреннего трения, которые в среднем оказались равными $26-30^\circ$. Ранее приводившиеся в литературе данные о лунных грунтах и исследовании их земных аналогов, как правило, сходились на цифрах $35-37^\circ$ и даже выше. В связи с этим

были поставлены дополнительные опыты с аналогами на вращательный сдвиг в атмосфере воздуха при 20°C и вакууме 10^{-5} мм рт. столба при 20 и 140°C .

В таблицах приведены данные для осредненных графиков зависимости $\tau_{\text{пред}} = F[\sigma]$. Как видно из табл. 12, 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 использовать при опытах на ТОР-1, в механике грунтов встречается впервые. До сих пор наименьшим диаметром образца признавали приблизительно 40 мм, что в 3,5 раза больше, чем на ТОР-1. В связи с этим были предприняты экспериментальные исследования масштабного фактора, которые еще продолжаются. Для опытов с пенетрацией было 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 20,5 Г составляет 0,33—0,45. Соответствующие поправки были 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 еще не установлено, и данные в табл. 11 приводятся без их учета.

На установке ТОР-1 велись также и испытания лунного грунта, доставленного «Луной-20», которые в общем дали результаты, сходные с результатами испытаний образца «Луны-16».

Сравнение фрикционных свойств исследуемых горных пород, находящихся в монолитном и тонкодробленном состоянии, 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, представленным базальтом, пенобетоном и плотным туфом. В этих экспериментах земные горные породы использовались как в виде монолитных образцов, так и в виде порошков, наклеенных на металлические

Таблица 13

Коэффициенты трения между лунным грунтом (и его аналогами) и различными контртелами

Контртело	Лунный грунт	Базальт монолит	Песок андезитово-базальтовый	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	»

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 среде вакуума со степенью разрежения 10^{-5} мм рт. столба.

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, равной 0,2 мм, насыпался 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 лунного грунта и его двух аналогов были определены 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 температуре. Далее воздух из камеры откачивался до давления 10^{-5} мм рт. столба, и параллельно с откачкой образец подвергался нагреву. Контроль температур осуществлялся хромель-конселевой 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

Таблица 14

Коэффициенты трения между базальтом и различными контртелами

Контртело	Условия эксперимента				
	в воздухе		в атмосфере гелия		в вакууме
	25° С	140° С	25° С	140° С	140° 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

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. 12 и 13.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ, ДОСТАВЛЕННЫХ ЭКСПЕДИЦИЯМИ «АПОЛЛОН»

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. 51 и 52).

Все кристаллические породы относятся к поверхностным лавам или изверженным породам, расположенным близко к поверхности. Они содержат магматические минеральные ассоциации и пустоты, свидетельствующие о кристаллизации из расплавов.

Темно-серый пористый обломок 1-го типа обладает объемным весом 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-коричневого цвета, с пустотами неправильной формы. Его объемный вес $3,2 \text{ г/см}^3$, структура зернистая, с зернами размерами от 0,2 до 3,0 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. 52). 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 необычная поверхность — наличие небольших углублений, выстланных стеклом, и стеклянных брызг. Средний диаметр ямок темного больше 1 мм. В нескольких образцах ямки наблюдались только на округленных сторонах, а на одной из сторон их не было. Именно эта сторона обычно более плоская и перовная. 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 эрозионных процессов.

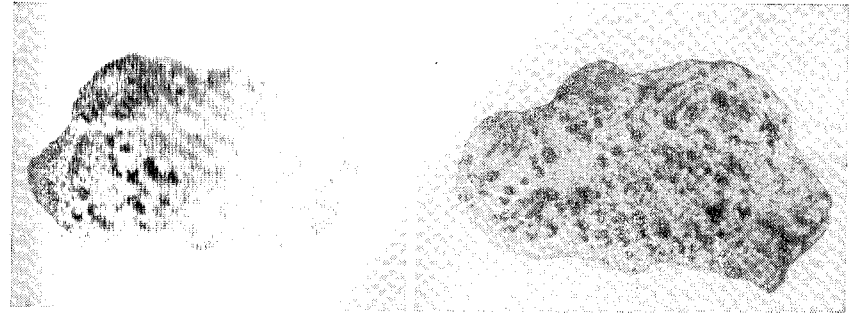


Рис. 51. Образцы пористых камней, доставленных кораблем «Аполлон-11»

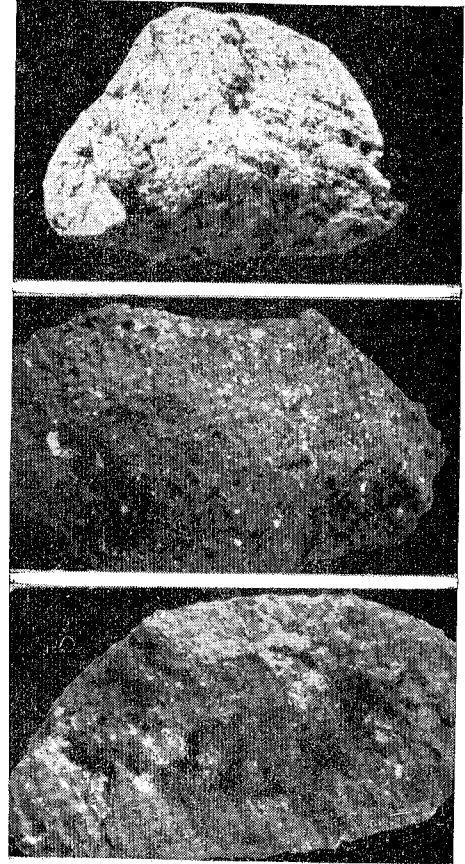


Рис. 52. Образцы брекчий, доставленных кораблем «Аполлон-11»

В образцах твердых пород присутствуют клинопироксен, плагиоклаз, ильменит и самородное железо. В незначительных количествах найден оливин.

На рис. 53, а представлен гранулометрический состав четырех образцов грунта, доставленных «Аполлоном-11». Первый (1) взят из контейнера с документированными образцами, второй и третий (2, 3) — из грунтоносков, четвертый (4) — из грунта, взятого без специального отбора с поверхности.

Все образцы представляют лунный реголит и по гранулометрии относятся к пылеватым пескам. Крупность зерен в основном колеблется между 1 и 0,03 мм. В состав песка входят угловатые обломки горных пород, кристаллические обломки минералов, стеклянные шарики, а среди крупных фракций также и каменно-стеклянные агрегаты. Слоистости не наблюдается. В грунтоносках длина образца составила 10 и 13,5 см.

В пробах найдены следующие минералы: плагиоклаз, клинопироксен, ильменит, оливин и стекло. Очень редко встречаются шарики и округленные зерна железоникелевого состава крупностью до 1 мм. Странные зерна говорят о перенесенном ими плавлении под действием сильных ударов. Так могли возникнуть стеклянные слезки, гагательки, пузыристые стекла и железоникелевые шарики.

Гранулометрический состав грунта «Аполлона-12» представлен на рис. 53, б. Все четыре кривые относятся к грунту, взятому грунтоносом. Кривая 4 относится к крупнозернистому слою, обнаруженному внутри образца. Этот слой состоит из гравелистого песка, а остальные пробы относятся к пылеватому песку, близкому по своему составу к грунту, доставленному «Аполлоном-11».

Крупность зерен увеличивается вместе с глубиной от поверхности.

Гранулометрический состав пяти образцов грунта «Аполлона-14» представлен на рис. 53, в. Два из них (1, 2), отобранные у Кош-кратера и из нижней части траншеи, отличаются от большинства ранее изученных образцов своим крупнозернистым составом и относятся к гравелистым пескам. В других образцах (3, 4, 5) была обнаружена масса сферических зерен. Во фракции мельче 62 мкм от 15 до 20% частиц представлены псевдоцилиндрическими нерегулярными формами. Была найдена сфера размерами около 100 мкм, по составу сходная с базальтом окружающей местности. На поверхности многих сферолитов были обнаружены следы железа и никеля, а иногда фосфора и серы.

Реголит гравелистого состава был обнаружен также в крупнозернистом слое из двойного грунтоноса «Аполлона-12». Все остальные образцы относятся к пылеватым пескам.

Фракции крупностью менее 2 мм характеризуются высоким содержанием стекла. Осколки минералов преобладают среди мелких зерен, чаще всего присутствуют плагиоклаз и пироксен. Во фракциях мельче 0,063 мм встречаются стеклянные осколки.

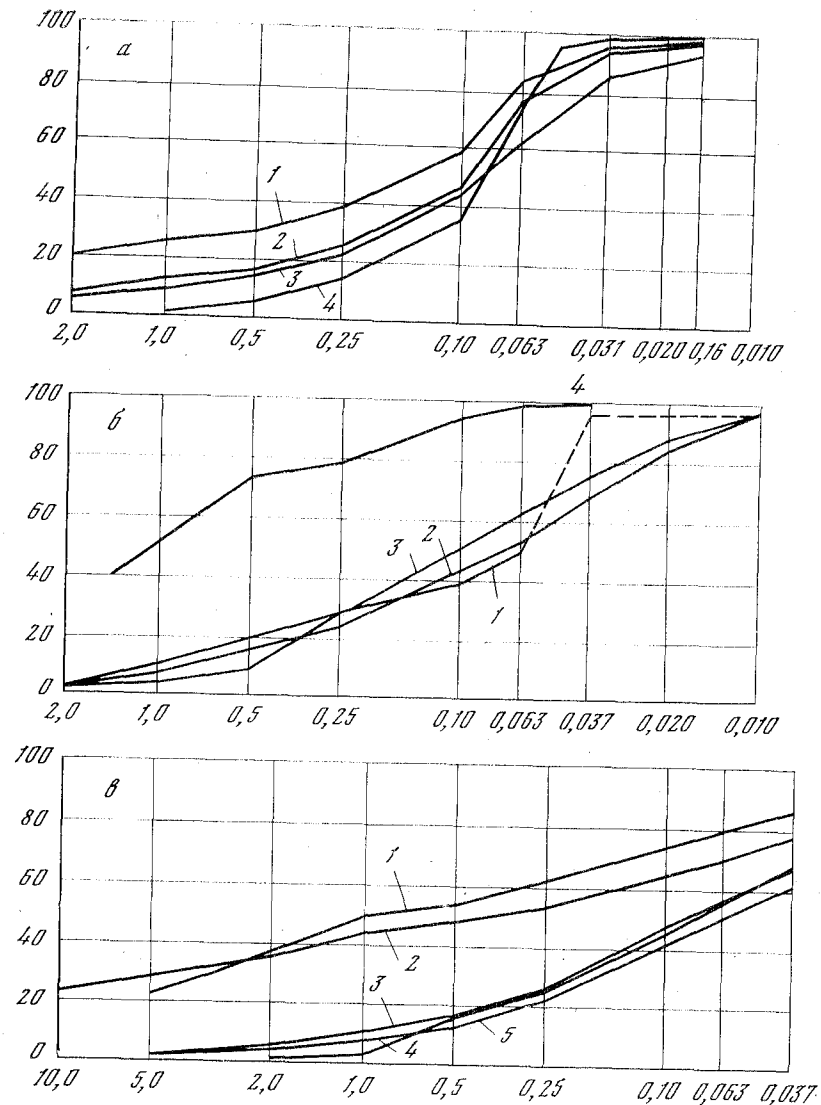


Рис. 53. Кривые гранулометрического состава образцов лунного грунта, доставленных кораблями «Аполлон-11» (а), «Аполлон-12» (б) и «Аполлон-14» (в):

по горизонтали — крупность частиц в мм, по вертикали — суммарное содержание частиц диаметром крупнее заданного в процентах по весу

остроугольные бесцветные или бледно-зеленые. С увеличением крупности зерен увеличивается содержание темно-коричневых стеклянных осколков, многие из которых аглютинированы. Встречаются стеклянные шарики. В более крупных фракциях увеличивается количество обломков горных пород. Обломки минералов — плагиоклаза, пироксена, оливина чаще встречаются среди фракции 0,033—0,063 мм.

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 рептенговской стереосъемки. Образцы имеют слоистое строение с толщиной слоев 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.

Определение объемного веса образцов в грунтоносах дало следующие результаты (в Г/см^3): «Аполлон-11» — верхняя часть — $\gamma = 1,74$, нижняя — $\gamma = 1,98$; «Аполлон-14» — $\gamma_{\text{мин}} = 1,60$; $\gamma_{\text{макс}} = 1,75$; «Аполлон-15» — $\gamma_{\text{мин}} = 1,36$, $\gamma_{\text{макс}} = 2,15$.

На поверхности зерен лунного мелкозема имеются следы сверхскоростных ударов мельчайших метеоритов. Снимки таких зерен были получены на сканирующем электронном микроскопе. Размеры частиц, представленных на снимках, колебались в пределах нескольких миллиметров, т. е. они относились к крупному и гравелистому песку. На одном из зерен можно было насчитать по крайней мере восемь следов 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 полый круглый шарик из хрупкого стекла диаметром около 5 мм и была пробита в нескольких местах. Вокруг пробойки образовались концентрические и радиальные трещины, создающие сходство с лунным кратером в миниатюре.

Другие частицы были сплошными. Хрупкий характер разрушения виден на рис. 54.

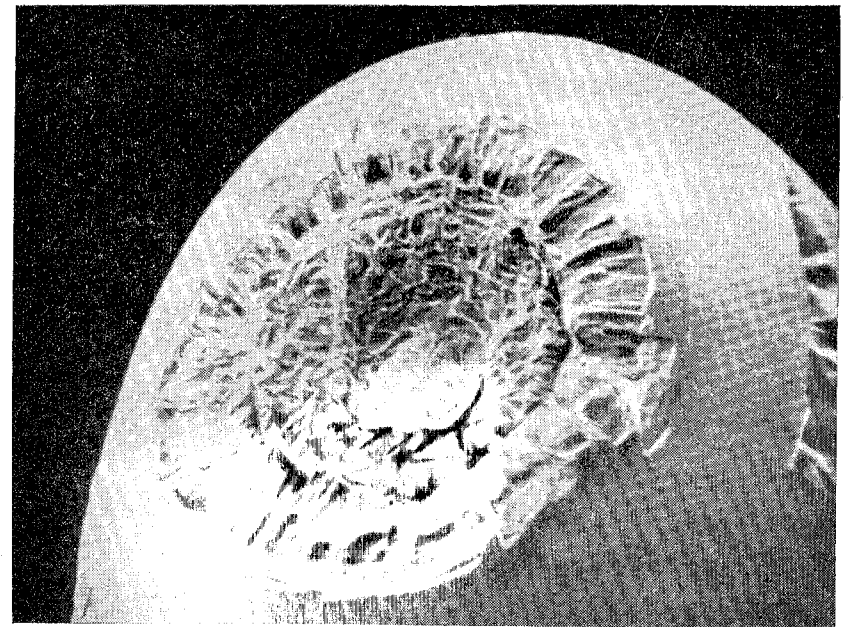
Постоянное взаимодействие микрометеоритов приводит к дроблению частиц реголита на более мелкие осколки, но в то же время вызывает их оплавление, которое затем ведет к слипанию мелких зерен в более крупные агрегаты. Эти два процесса, по-видимому, уравновешивали друг друга. Удары более крупных метеоритов вызывают выброс вещества из кратера. Выбросы из самых больших кратеров, возможно, распространяются на всю поверхность Луны. Благодаря этому на Луне вполне вероятны весьма 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 коротких дистанциях.

В работе, опубликованной в конце 1973 г., американские ученые В. Кэрвер, Дж. Митчел и Л. Мазмуд описывают результаты комплексного исследования гранулометрии, формы зерен, удельного веса и максимальной плотности лунного реголита, проведенного на нескольких образцах весом 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 аглютинаты. Последние представляют собой осколки минералов, пород и стекол, слипшиеся в неоднородную 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 группами (по американской классификации, от SW — SM до ML).

Рис. 54. Зерно реголита со следами хрупкого разрушения под ударами микрометеоритов (сильно увеличено)



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 одном направлении. Стеклообразные 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 $0,24 \text{ г/м}^2$, «Аполлона-15» — $0,65 \text{ г/м}^2$.

Удельный вес зерен, согласно имеющимся данным, колеблется от 2,9 до $3,2 \text{ г/см}^3$. Только у высокопористых агломератов он снижается до $1,0 \text{ г/см}^3$.

Плотность самого реголита увеличивается с глубиной. Она быстро растет в пределах первых 10 см от поверхности, а затем значительно медленнее. Если принять за 100% максимальную плотность утрамбованного образца реголита, то на поверхности Луны плотность будет 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 penetromетра в камере с атмосферой азота.

Испытания проводились при трех различных значениях плотности образца $\rho = 1,36, 1,77$ и $1,80 \text{ г/см}^3$. При этом оказалось, что грунт при $\rho = 1,36 \text{ г/см}^3$ оказывает столь малое сопротивление пенетрации, что пружина penetromетра не сжимается и погружение прибора происходит только под влиянием его веса, равного около 187 Г, на глубину от 0,63 до 1,95 см при площади индентора, равной 0,32 см². Уплотненный грунт при $\rho = 1,77 \text{ г/см}^3$ уже выдерживает нагрузку от 187 до 1000 Г при той же площади, а коэффициент постели, определяемый как отношение среднего давления под индентором к глубине его погружения, составляет от 0,72 до $1,24 \text{ кг/см}^3$. В максимально уплотненном состоянии при $\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$ коэффициент постели поднимается до $1,69—2,35 \text{ кг/см}^3$. Последние два числа получены при площади индентора, равной $2,68 \text{ см}^2$.

Как видно, плотность упаковки играет очень большую роль в несущей способности лунного грунта, что наблюдается и у зернистых грунтов Земли. Кроме того, замечено, что песчаная способность сильно возрастает, если лунный грунт поместить в обойму, ограничивающую его боковые деформации, что также характерно для земных несвязных зернистых грунтов. При вдавливании penetromетра в рыхло насыпанный лунный мелкозем с плотностью

$1,36 \text{ г/см}^3$ поднимались четко очерченные цилиндрические лунки без повреждения окружающей поверхности. При внедрении того же penetromетра в утрамбованный лунный грунт с плотностью $1,8 \text{ г/см}^3$ вокруг лунок образовались 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 выделило профессору Л. Д. Джаффе и Р. Ф. Скотту всего $1,3 \text{ Г}$ 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 1,0 мм были отобраны вручную.

В статьях, опубликованных Л. Д. Джаффе и Р. Ф. Скоттом, упоминаются три метода определения механических свойств этого образца: испытания на пенетрацию, испытания в приборе одноплоскостного сдвига и испытания 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 вдавливании и нагрузки. Опыты проводились при изменении плотности от 1,15 до $1,93 \text{ г/см}^3$. 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 $0,0021 \text{ см/с}$. 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 ($\rho \leq 1,62 \text{ г/см}^3$) стержень погружался без растрескивания или вспучивания окружающей поверхности. После того как плотность становилась более $1,62 \text{ г/см}^3$, эти явления наблюдались во всех опытах. Радиография показала, что при испытании грунта с малым объемным весом под отверстием, созданным вдавливанием стержня, образуется цилиндрический вертикальный пух из уплотненного грунта. После удаления стержня вертикальные стенки отверстия сохраняются, что говорит о наличии сцепления между зернами.

На рис. 55 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 вдавливания, равной диаметру стержня, было принято в качестве меры несущей способности грунта. Оказалось, что несущая способность зависит от плотности грунта.

Соответствующий график представлен на рис. 56. Кривая на нем отличается 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 $4,7 \text{ мкм/с}$. Перемещение измерялось с точностью $2,5 \text{ мкм}$.

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 поршень и оставалось на протяжении каждого опыта постоянным. Положение поршня измерялось с помощью микроскопа и использовалось для вычисления объема и плотности образца. Навеска лунного грунта в каждом опыте была равна 200 мг . Внешний вид прибора представлен на рис. 57.

Применялись пять разных методов зарядки прибора: свободная засыпка и выравнивание добавкой грунта, засыпка с помощью

Рис. 55. Результаты пенетрации в пробе грунта, доставленной в ковше аппарата «Сервейер-3»:

1 — плотность в г/см^3 , 2 — масштаб 1:1, 3 — масштаб 1000:1, 4 — масштаб 10:1, 5 — масштаб 1:1. По вертикали — напряжение в $0,1 \text{ кг/см}^2$, по горизонтали — пенетрация в долях диаметра индентора

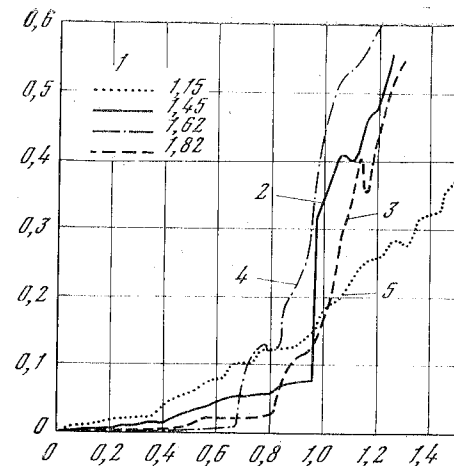
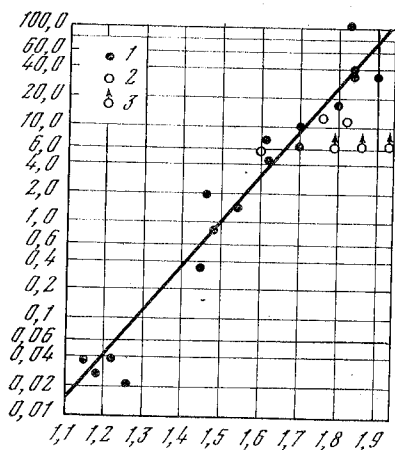


Рис. 56. Зависимость между плотностью лунного грунта и его несущей способностью по результатам испытаний пробы грунта, доставленного в ковше аппарата «Сервейер-3»:

1 — прямое измерение, 2 — экстраполяция, 3 — экстраполяция, нижний предел. По горизонтали — плотность в г/см^3 , по вертикали — несущая способность в $0,1 \text{ кг/см}^2$



шпателя и выравнивание им же, набивка чашки шпателем отдельными порциями с нажимом, то же с последующей пригрузкой $0,27 \text{ кг/см}^2$ после полного наполнения чашки, то же с пригрузкой $0,27 \text{ кг/см}^2$ 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 свежевыпавшего реголита равна $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$, а уплотнение происходит под действием собственного

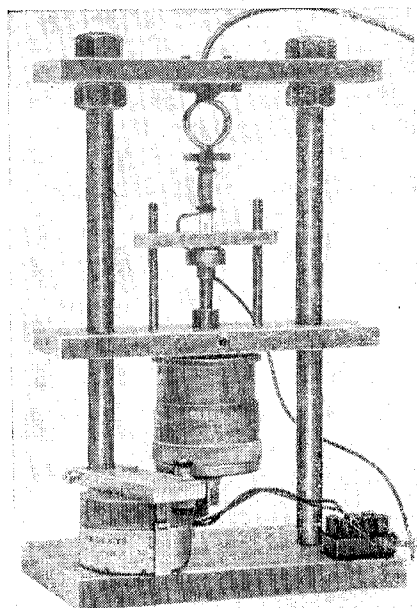


Рис. 58. Прибор трехосного сжатия, использованный Р. Ф. Скоттом

Определение сжимаемости дало следующие результаты:

Номер опыта	ϵ	$\Delta\epsilon$	Δp_i , кг/см ²	a , см ² /кг	E_0 , кг/см ²
1a	0,684	0,043	0,070	0,605	2,64
2a	0,854	0,095	0,140	0,690	2,57
2б	0,759	0,340	0,0340	0,100	15,80
2в	0,728	0,020	0,58	0,034	47,50

Модуль общей деформации вычислен для среднего значения коэффициента Пуассона $\mu = 0,2$.

Результаты определения сопротивления сдвигу таковы:

Номер опыта	ϵ	σ , кг/см ²	$\tau_{пред}$, кг/см ²
1a	0,612	0,312	0,644
1б	0,550	0,699	0,714
2	0,708	0,357	0,529

По результатам этих опытов нельзя однозначно установить значения c и ϕ для различных значений ϵ . Однако косвенным путем было найдено, что сцепление изменяется в пределах от $c=0$ до $c=0,007$ кг/см², а угол внутреннего трения у рыхлого образца равен $\phi = 27^\circ$ и у плотного $\phi = 33-35^\circ$.

Параллельные опыты с молотым базальтом показали, что сопротивление сдвигу исследованного образца реголита составляет 67% сопротивления молотого базальта в одинаковых условиях.

Какое же практическое значение имеют результаты исследования грунтов Луны?

Прежде всего данные о лунных грунтах, которые ученые получали в ходе своих работ, немедленно использовались конструкторами автоматических лунных станций, лунных кораблей, скаффолдов и обуви космонавтов, оборудования и снаряжения экспедиций на Луну. Только на базе тех сведений о грунтах Луны, которые были накоплены на предварительных этапах ее изучения, оказалось возможным осуществить успешную посадку автоматов и лунных кораблей на Луну, а затем обеспечить и движение по ней людей и луноходов.

При дальнейшем изучении и освоении Луны, несомненно, потребуется устройство подземных и заглубленных в грунт сооружений для защиты космонавтов и оборудования от радиации и микрометеоритов. Потребуются исходные данные для определения давления грунта на эти сооружения и расчета толщины защитных слоев.

Создание машин и механизмов для разработки лунных грунтов также невозможно без исходных данных о физико-механических свойствах поверхностных и подстилающих слоев и особенностях их взаимодействия с рабочими органами таких машин.

Далее, наземные испытания различной лунной техники, тренировка космонавтов и изучение износа материалов и механизмов при воздействии с грунтом требуют создания на Земле различных полигонов и испытательных площадок с поверхностью из материалов, имитирующих лунные грунты. Известно, что астронавты экспедиций «Аполлон» проводили специальные занятия на вулканических отложениях, а ходовые испытания макетов самоходного шасси советских луноходов были проделаны на земных аналогах лунных грунтов. Твердые вулканические породы использовались для моделирования лунных грунтов при отработке процессов посадки лунных аппаратов и кораблей и при испытаниях буровых инструментов. Метод физического моделирования грунтов, широко использованный в исследованиях, несомненно найдет дальнейшее применение не только для лунного реголита, но и грунтов поверхности Меркурия и Марса.

Наконец, в ходе исследования грунтов Луны были разработаны новые методы и новые приборы, применение которых имеет перспективы и на Земле. Сюда прежде всего относятся дистанционные методы измерений, которые позволяют использовать приборы в недоступных и опасных для человека местах, а их показания передавать на пультах, расположенные в нормальных условиях. Автоматы, использованные на Луне, — такие, как грунтомер-пенетрометр «Луны-13», буровые станки «Луны-16 и -20», приборы для определения проходимости на луноходах, манипулятор на «Сервейерах» и телекамеры АЛС, служат примерами успешных решений конструкторских проблем при создании приборов с дистанционным управлением.

Всеобщая тенденция к миниатюризации габаритов и веса приборов несомненно коснется в ближайшем будущем и аппаратуры для исследования грунтов. Опыт создания микроминиатюрных приборов для исследования малых образцов лунного реголита может оказаться при этом весьма полезным.

В ходе исследований лунных грунтов широко использовались косвенные методы оценки их структуры и механических свойств при помощи детального изучения фотоснимков природной и деформированной поверхности. Это направление, как известно, уже широко используется в практике аэрофоторазведки в различных отраслях народного хозяйства. Методы оценки гранулометрического состава путем фотоанализа уже начинают применяться и в исследованиях грунтов Земли.

Таким образом, работа с грунтами Луны позволила успешно решить весьма сложные вопросы посадки и движения по лунной поверхности, привела к разработке новых методов исследования и новых приборов и открыла путь к использованию этих средств в практике инженерно-геологического изучения земных грунтов.

ЛИТЕРАТУРА

- Виноградов А. П. Новый важный этап в изучении Луны. — В сб.: Освоение космического пространства в СССР. М., 1971.
- Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли, Луны и планет. М., 1973.
- Леонович А. К., Громов В. В., Ложкин В. А. и др. Исследование физико-механических свойств образца лунного грунта, доставленного АЛС «Луна-20», и по трассе движения самоходного аппарата «Луноход-2». Доклад на XXIV конгрессе МАФ, 1973.
- Лунный грунт из Моря Изобилия. Отв. ред. А. П. Виноградов. М., 1973.
- Первые панорамы лунной поверхности, т. I, М., 1966; т. II, М., 1971.
- Передвижная лаборатория на Луне «Луноход-1». Отв. ред. А. П. Виноградов. М., 1971.
- Скуридин Г. А. Изучение Луны и планет космическими аппаратами. М., 1971.
- Сурков Ю. А. Новое о лунном веществе. — «Земля и Вселенная», 1967, № 5.
- Троицкий В. С., Тихонова Г. В. Тепловое излучение Луны и физические свойства ее верхнего покрова. — «Изв. вузов. Радиофизика», 1970, т. XIII, № 9.
- Труды Советско-Американской конференции по космохимии Луны и планет. М., 1974.
- Цытович Н. А. Механика грунтов. М., 1973.
- Черкасов И. И., Шварев В. В. Начала грунтоведения Луны. М., 1970.
- Apollo 11, 12, 14, 15, 16, 17. Prelim. science reports. Wash., 1969, 1970, 1971.
- Jaffe L. D., Alley C. O. et al. Principal sci. results from Surveyor program «Icarus», 1970, v. 12, 1—41.
- Jaffe L. D. Shear strength of lunar soil from Occator. Proc. Lunar Sci. Conf. «The Moon», 1973, v. 8.
- Surveyor project final report. Part II Science results. Wash., 1970.
- Carrier W., Mitchell J. K., Mahmood I. The nature of lunar soil. Journ. of the soil mech. and found. div. ASCE, Oct. 1963.
- Scott R. F. On meeting an old friend. Eng. and Science Mag. Feb. 1970.

57 коп.



ИЗДАТЕЛЬСТВО · НАУКА ·