

УДК 523.34-83

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛУННОГО ГРУНТА (ОБЗОР)

© 2014 г. Е. Н. Слюта

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва**e-mail: slyuta@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.06.2013 г.

Приводится обзор данных по физико-механическим свойствам лунного грунта, полученных в результате исследований как непосредственно на поверхности Луны в пилотируемых и автоматических экспедициях, так и в экспериментальных лабораторных исследованиях лунного грунта, доставленного на Землю. Отдавая должное пилотируемой программе США Apollo, большой объем данных о свойствах лунного грунта, что хорошо видно из предлагаемого обзора, был получен и благодаря советской автоматической программе Луноход, и с помощью автоматических станций Луна-16, -20 и -24, доставивших лунный грунт на Землю. Рассматриваются все основные физико-механические свойства лунного грунта, такие как гранулометрический состав, плотность и пористость, когезия и адгезия, угол внутреннего трения, прочность рыхлого грунта на сдвиг, деформационные характеристики (модуль деформации, коэффициент поперечной деформации), сжимаемость, несущая способность, и показано изменение некоторых свойств с глубиной. В большинстве случаев приводится аналитическая зависимость основных параметров, необходимая для создания надежных инженерных моделей лунного грунта. Приводится сводная таблица всех основных физико-механических свойств и краткий обзор существующих моделей и имитаторов лунного грунта.

DOI: 10.7868/S0320930X14050053

ВВЕДЕНИЕ

Физико-механические свойства лунного грунта объединяют такие основные параметры, как гранулометрический состав, плотность и пористость, когезия и адгезия, угол внутреннего трения, прочность рыхлого грунта на сдвиг, деформационные характеристики (модуль деформации, коэффициент поперечной деформации), сжимаемость, несущая способность и др. Знание основных физико-механических свойств необходимо, прежде всего, для создания надежных инженерных моделей лунного грунта с целью разработки различных посадочных аппаратов на лунную поверхность, для создания грунтозаборных устройств, для создания самоходных или иных транспортных средств для передвижения по лунной поверхности, для проектирования и строительства обитаемых баз, для разработки и создания технологических комплексов по добыче и обогащению необходимых ресурсов, и т.д. Поэтому одной из первых важных научных задач на начальном этапе исследования Луны была задача определения основных параметров физико-механических свойств лунного грунта.

До мягкой посадки советской АМС Луна-9 в 1966 г. первые данные о свойствах лунного грунта были получены по результатам дистанционных исследований с Земли ее оптического, теплового и радиоизлучения. На основе этих исследований

было сделано предположение, что “вещество во всем двадцатиметровом слое находится в одинаковом сильно пористом состоянии и, по-видимому, не может быть пылью” (Кротиков, Троицкий, 1963). Из сравнения интегрального излучения Луны с экспериментальным спектром были предложены две модели пористого покрова Луны (Тихонова, Троицкий, 1969). В одной из моделей плотность пористого слоя вплоть до подстилающих скальных пород оставалась постоянной. В другой модели плотность менялась линейно. В первой модели толщина пористого слоя оценивалась около 4 м, во второй – около 10 м. Рассматривалась и трехслойная модель пористого покрова, в которой плотность верхнего слоя толщиной 0.04 м оценивалась около 0.7 г см^{-3} , слоя в интервале глубины 0.04–4 м – около 1 г см^{-3} , а слоя в интервале глубин 4–6 м – от 1.5 до 2 г см^{-3} (Троицкий, Тихонова, 1972). На основе фотометрических измерений Луны харьковский астроном Н.П. Барабашов также предполагал, что лунная поверхность покрыта мелким щебнем и является достаточно прочной (Шкуратов, 2006). Но существовало и достаточно распространенное мнение (гипотеза Голда), что из-за малой силы тяжести поверхность Луны может быть покрыта многометровой пушистой рыхлой пылью, которая просто поглотит посадочный космический аппарат. После консультаций с астрономом Н.П. Барабашовым Сергей Павлович Королев разрешил эту

критическую для инженерных расчетов неопределенность, написав карандашом соответствующую справку от 28 октября 1964 года, которая гласила, — “Посадку ЛК следует рассчитывать на достаточно твердый грунт типа пемзы. Вертикальная скорость ≈ 0 м/с при спуске на $h = 1$ м..., дата, подпись”.

Физико-механические свойства лунного грунта активно изучались непосредственно на поверхности Луны в пилотируемых и автоматических экспедициях и в экспериментальных лабораторных исследованиях лунного грунта, доставленного на Землю. В настоящее время физико-механические свойства лунного грунта достаточно хорошо исследованы. Отдавая должное пилотируемой программе США Apollo, следует отметить, что большой объем уникальных научных данных о свойствах лунного грунта был получен и благодаря советской автоматической программе Луноход, и с помощью автоматических станций Луна-16, -20 и -24, доставивших лунный грунт на Землю.

После некоторого перерыва интерес к Луне со стороны человеческой цивилизации возвращается. Основной стратегией космических исследований Солнечной системы на период до 2030–2050 гг. рассматривается детальное изучение Луны, опирающееся на автоматические космические аппараты и робототехнические системы, и начало ее освоения, включая пилотируемые экспедиции и разветвление элементов инфраструктуры для создания обитаемой лунной базы. С точки зрения перспектив будущего освоения большое значение приобретает оценка и разведка ресурсов, необходимых для жизнеобеспечения и получения криогенных компонентов для ракетного топлива на месте. В разных странах, в том числе и в России, уже проектируются и разрабатываются как стационарные, так и самоходные автоматические посадочные аппараты. Соответственно, и данные по физико-механическим свойствам лунного грунта вновь становятся все более востребованными. Предлагаемый обзор фактически подводит некоторый итог по имеющимся на сегодня данным по физико-механическим свойствам лунного грунта, а также может рассматриваться в качестве основы для уточнения и получения новых данных с учетом новых масштабных задач по исследованию и освоению Луны.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Отсутствие плотной атмосферы делает поверхность Луны незащищенной от ударов метеоритов самых разных размеров, вплоть до мельчайших микрометеоритов. В результате метеоритной бомбардировки, длившейся на протяжении всей геологической истории Луны, на ее поверхности образовался покров рыхлого материала — реголита,

который состоит из обломков подстилающих реголит кристаллических горных пород, фрагментов минералов и вторичных частиц, сформированных при ударно-взрывной переработке вещества — брекчий, агглютинатов и частиц стекла. Химический состав определяется в основном составом коренных пород района. Геохимия процесса реголитобразования определяется притоком вещества из других районов, добавлением метеоритного вещества (до 1–2 мас. %) и обеднением летучими компонентами в результате плавления и селективного испарения вещества. Постоянное воздействие солнечного ветра и космического излучения обогащает частицы реголита водородом, редкими газами, широким спектром космогенных изотопов и другими компонентами, а также способствует образованию и восстановлению до элементарного состояния Fe, Si и др. элементов в поверхностных слоях частиц. Средняя мощность реголита, который покрывает всю лунную поверхность, колеблется от 4–5 м в лунных морях до 10–15 м на материках. На древних геологических структурах мощность реголита больше. Средняя скорость образования реголита очень мала и составляет примерно 1.5 мм за 1 млн лет (French, 1977). Поверхностный слой глубиной 1 см переворачивается примерно один раз за 10^7 лет. За это же время поверхностный слой глубиной 1 мм переворачивается 250 раз, а поверхностный слой глубиной 0.1 мм — более 2000 раз (Херц и др., 1975). Соответственно, реголит быстро становится неподвижным с глубиной и его слоистость или стратификация отражает хронологию событий и геологическую историю его формирования, которая иногда нарушается или изменяется при более крупном, но более редком ударном событии.

Рыхлый слой реголита покрывает почти всю поверхность Луны. Наблюдается прямая зависимость, — чем больше возраст поверхности, тем больше мощность реголита. Эта зависимость достаточно хорошо согласуется с хроностратиграфическими подразделениями лунных образований. Распределение мощности реголита на поверхности Луны имеет бимодальный характер с максимумами примерно 5 и 9 м, что соответствует средним значениям мощности реголита для морей и материков (Бондаренко, Шкуратов, 1998). В морских районах мощность реголита изменяется от 3 до 11 м. В материковых районах разброс мощности реголита гораздо более широкий — от 1 м в высокогорной местности до 18 м и более в районах плоскогорья с наиболее древним возрастом подстилающих пород.

Реголит характеризуется уникальным химическим и минералогическим составом, а также определенными теплофизическими и электромагнитными свойствами. Низкая теплопроводность, высокие адгезионные и когезионные свойства, отсутствие несвязанной воды и других летучих, вы-

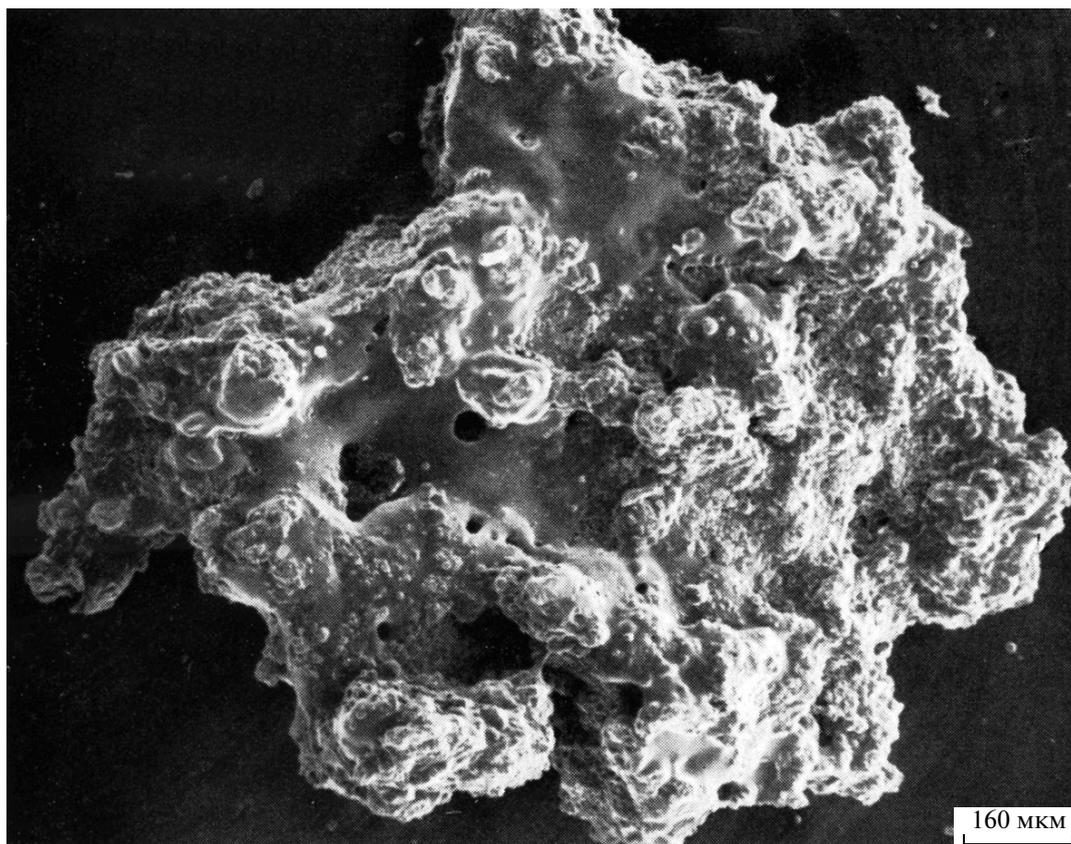


Рис. 1. Типичная частица агглютината лунного реголита (Родэ и др., 1979). Форма и поверхность частицы обусловлены оплавлением и спеканием литических фрагментов, минеральных и стеклянных зерен лунного реголита в одну частицу при высокоскоростном метеоритном ударе. Луна-16, Море Изобилия.

сокая обогащенность размерной фракцией частиц в десятки микрон, поверхность которых активизирована космическим облучением, обогащенность стеклом, а в ряде мест — тяжелыми рудными минералами (ильменитом), позволяет рассматривать реголит в качестве наиболее доступного местного теплозащитного и строительного материала.

МОРФОЛОГИЯ ЧАСТИЦ РЕГОЛИТА

Морфология частиц, слагающих реголит, сильно зависит от степени его зрелости. Для крупнообломочного материала реголита (камней) характерно, что с увеличением зрелости обломки приобретают округленные сглаженные очертания. Находящиеся на поверхности частицы лунного грунта и крупные обломки пород постепенно покрываются микрократерами размером от долей микрона до нескольких сантиметров. Камни на лунной поверхности разрушаются не за счет постепенной эрозии микрократерами — они ею лишь “сглаживаются”, а в результате раскалывания более крупными ударами. Число крупных метеоритных тел с массой больше m (кг), выпадающих на всю лунную поверхность за год, составля-

ет около $1.9 \times m^{-0.66}$ (Меллош, 1989). Среднее время существования на лунной поверхности камня массой 1–2.5 кг до того, как он будет разрушен, составляет около 11 млн лет (Gault и др., 1973). Растрескивание лунных пород в результате термоупругих напряжений, возникающих в приповерхностном слое из-за сжатия и расширения в результате суточного хода температур, также является одним из агентов сглаживания лунной поверхности и постепенного разрушения камней, хотя по интенсивности и несравнимым с метеоритной бомбардировкой (Duennebier, Sutton, 1974).

Поверхность мелких частиц реголита также постепенно изменяется под воздействием двух основных факторов. Первый связан с агглютинацией, т.е. с разбрызгиванием и налипанием стекла на поверхности при ударе (рис. 1, 2а). Второй, напротив, с эрозией поверхности частиц, которая контролируется преимущественно двумя микроскопическими процессами. Один из них — ионизирующее облучение ионами солнечного ветра и галактическими космическими лучами — вызывает эрозию поверхности на атомном уровне и называется спатерингом (sputtering). Второй, он же наиболее эффективный, связан с плавлением и

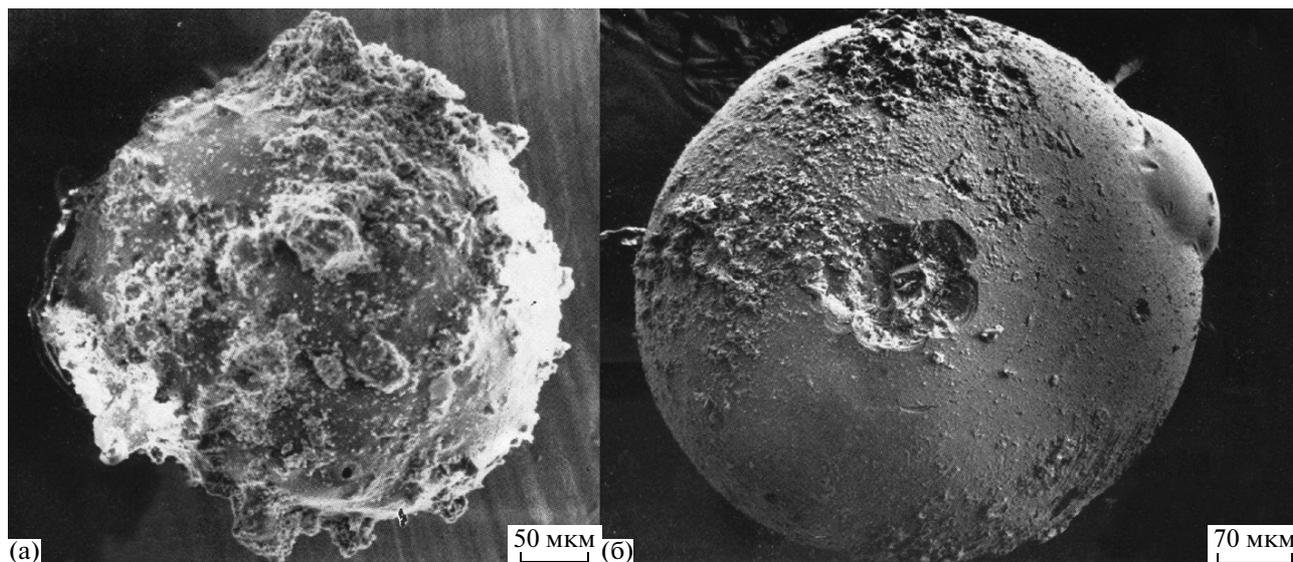


Рис. 2. Стекланные сферические частицы реголита (Родэ и др., 1979). (а) Спекание частиц реголита на поверхности стекланный сферической частицы, (б) ударный микрократер на поверхности стекланный сферической частицы реголита. Луна-16, Море Изобилия.

экскавацией (удалением) вещества из микрократеров при ударе высокоскоростными микрометеороидами (частицами космической пыли) (рис. 2б). Интенсивность микрометеоритного потока, образующего кратеры размером от 1 мкм до нескольких мм в диаметре, оценивается в $(1-7) \times 10^{-5} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для масс $\geq (1 \pm 0.4) \times 10^{-12} \text{ г}$, что согласуется с данными, полученными со спутников (Фехтиг и др., 1975). Эффективность и/или длительность воздействия рассмотренных выше экзогенных факторов определяют зрелость (экспозиционный возраст) реголита, т.е. время его пребывания на лунной поверхности.

Форма индивидуальных частиц реголита изменяется от сферической до сильно вытянутой. По степени вытянутости частицы подразделяются на две группы – с отношением главных осей (a/c , $a \geq c$) < 1.3 , и с отношением осей > 1.3 . Среднее взвешенное отношение для продолговатых частиц находится в пределах от 1.31 до 1.39 (Неуууд, 1971; Маhмоод и др., 1974). Продолговатые или вытянутые частицы в результате постепенного уплотнения в реголите и в зависимости от условий отложений часто бывают сориентированы в каком-то одном преимущественном направлении (Маhмоод и др., 1974). Следствием подобной доминирующей ориентации частиц является пространственная анизотропия физико-механических и теплофизических свойств реголита. Например, теплопроводность реголита или предел прочности на сдвиг в горизонтальном направлении будет отличаться от аналогичных характеристик в вертикальном направлении.

Удельная площадь поверхности частиц реголита определяется делением площади поверхности на массу частицы и выражается в единицах $\text{м}^2 \text{ г}^{-1}$. Для сферических частиц удельная площадь поверхности (S_y) частицы обратно пропорциональна ее диаметру:

$$S_y = 6/dG\rho_w, \tag{1}$$

где d – диаметр сферы в микрометрах, G – удельная плотность, ρ_w – плотность воды (1 г см^{-3}). Зависимость удельной площади поверхности от размера для шариков с удельной плотностью 3.1, характерной для лунного реголита (Сaггiеr, 1970; Сoстес и др., 1970), показана в табл. 1. Для сравнения, земные глинистые минералы характеризуются гораздо более высокой удельной площадью поверхности, чем частицы лунного реголита (Mitchell, 1976).

В порядке усложнения формы мелкообломочный материал реголита по морфологии разделяется на 3 группы: (1) шарики стекла и металла – образования наиболее правильной формы (рис. 2); (2) остроугольные обломки различных пород, ми-

Таблица 1. Удельная площадь поверхности частиц в зависимости от их диаметра (Сaггiеr и др., 1991)

Диаметр, мкм	Удельная площадь поверхности, $\text{м}^2 \text{ г}^{-1}$
1000	0.0019
100	0.019
10	0.19
1	1.9

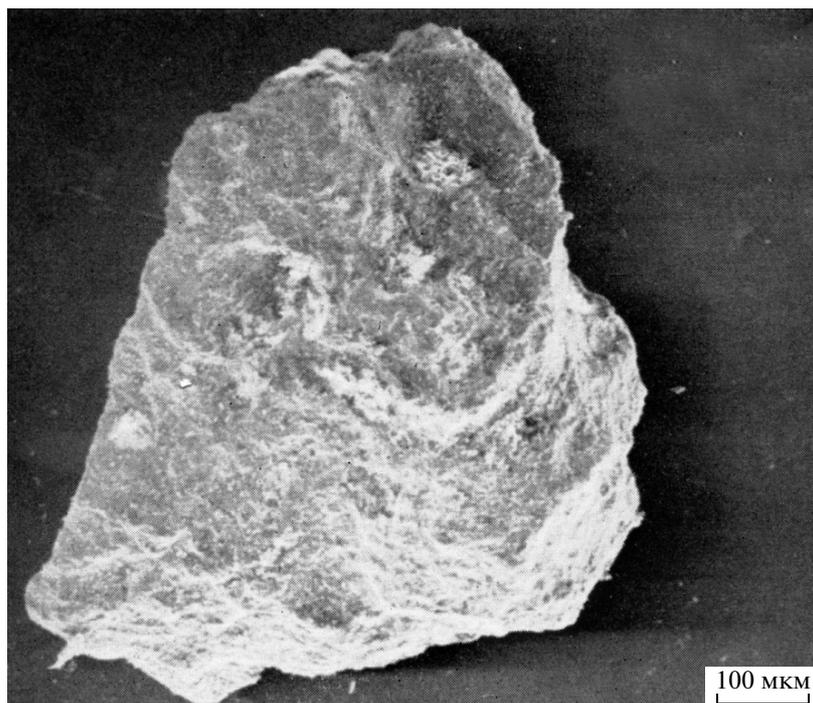


Рис. 3. Обломок морского базальта неправильной угловатой формы (Родэ и др., 1979). Луна-16, Море Изобилия.

нералов и стекол — промежуточные по степени правильности (рис. 3–7); (3) спекшиеся и ошлакованные частицы — обычно с неправильными дендритовидными формами (рис. 1) (Флоренский и др., 1975). С течением времени по мере увеличения зрелости реголита происходит увеличение доли агглютинатов и шлаков, количественно некомпенсированное приростом доли шариков, и, в среднем, морфология частиц зрелого реголита становится более сложной.

По гранулометрическим и морфологическим характеристикам лунный реголит не имеет прямых аналогов среди природных земных образований, как правило, более однородных.

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ РЕГОЛИТА

В подавляющем большинстве случаев лунный реголит характеризуется логнормальным распределением частиц по размерам (McKay и др., 1974; Стахеев, 1979). Поэтому данные по распределению частиц в зависимости от размера обычно представляют в ϕ -единицах в логарифмической шкале: $\phi = -\lg_2 d$, где d — размер частиц в миллиметрах (Mitchell, 1976; Morris и др., 1983). Размер частиц лунного реголита контролируется дроблением в результате метеоритной и микрометеоритной бомбардировки, которое уменьшает размер частиц, и агглютинацией (разбрызгиванием и налипанием стекла при ударе), увеличивающей раз-

мер частиц. Наблюдаемое резкое снижение в лунном реголите содержания частиц размером меньше 20 мкм происходит вследствие именно процесса агглютинации (Duke и др., 1970). Но если бы работали только эти два процесса, то, в конечном счете, все более мелкое дробление, с одной стороны, и агглютинация, с другой, привели бы к повсеместному распространению очень однородной и тонкозернистой фракции, являющейся результатом уравновешенного взаимодействия этих двух противоположно направленных процессов.

Поэтому стационарно-равновесная модель формирования лунного реголита включает еще один механизм, контролирующий размер частиц и препятствующий более тонкой сортировке частиц. Это непрерывное добавление в стационарно-равновесный процесс дробления и агглютинации камней и частиц более крупного размера, которое происходит в результате образования крупных ударных кратеров, вскрывающих и вновь разрушающих подстилающие скальные лунные породы (bedrock) (McKay и др., 1974). Часть этого материала захоранивается, часть подвергается дальнейшему дроблению и агглютинации. Но стационарно-равновесная модель формирования реголита была бы неполной, если бы не учитывала также и постоянную добавку тонкозернистой фракции реголита различного состава и происхождения и разной степени зрелости в результате баллистической транспортировки выбросов из отдаленных

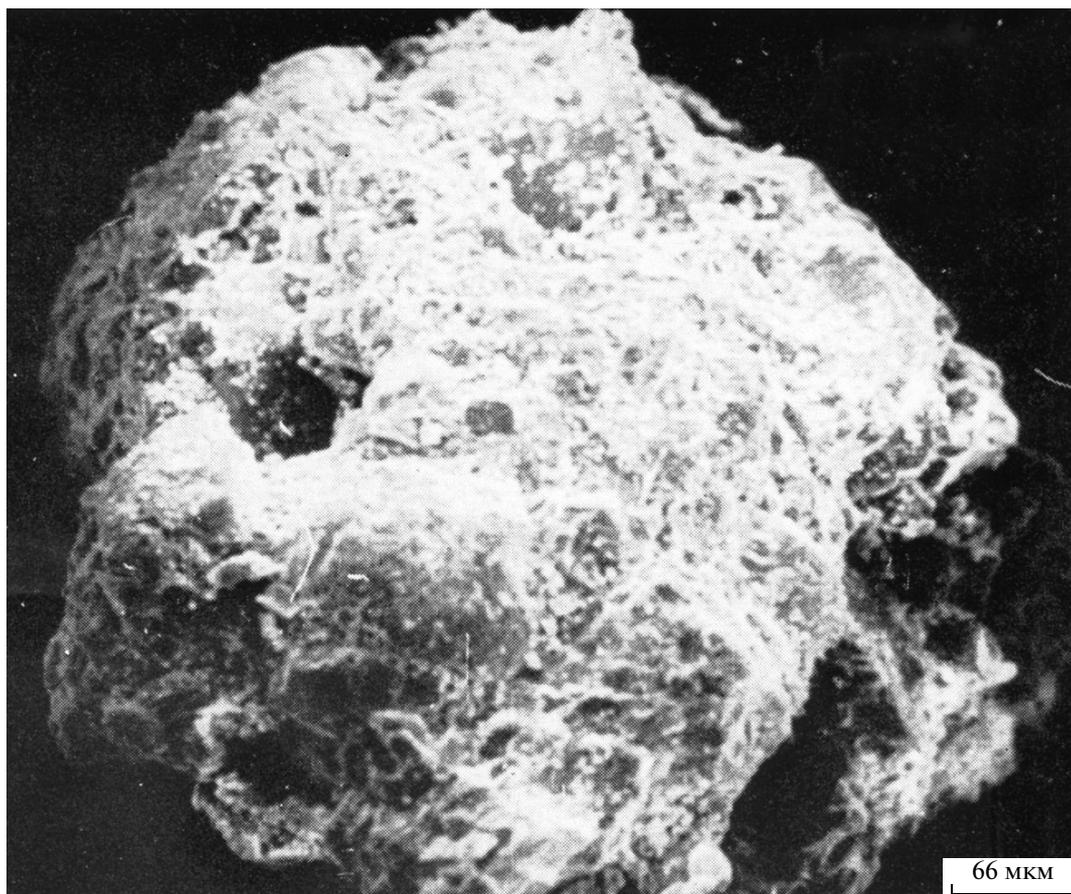


Рис. 4. Обломок породы анортозит-троктолитового (АНТ) состава неправильной формы с включениями металлического железа (темные участки) (Родэ и др., 1979). Луна-20, материковый район.

ударных кратеров. Таким образом, стационарно-равновесная модель, включающая все рассмотренные выше механизмы формирования лунного реголита, фактически предсказывает прямую зависимость между средним размером частиц реголита и мощностью реголита, т.е. чем меньше средний размер, тем больше мощность реголита. Это согласуется и с другими данными, — чем меньше средний размер, тем более зрелый реголит, и чем древнее подстилающие породы, тем больше мощность реголита.

Исследования гранулометрического состава лунного реголита показали тесную взаимосвязь параметров распределений размеров частиц, мощности реголита и индексов зрелости реголита, которые характеризуют степень переработки лунного реголита. Наибольшей корреляционной зависимостью среди параметров распределений размеров частиц с мощностью реголита характеризуется стандартное отклонение размеров частиц. Найденная зависимость определяется выражением

$$\sigma_{ст} = 1.53 + 0.102h_{рег}, \quad (2)$$

где $h_{рег}$ — региональная мощность реголита (Стасеев, Лаврухина, 1979). Например, полученные оценки мощности реголита в местах посадок станций Луна-16 (восточная часть Моря Изобилия) и Луна-20 (Материковый район к северу от Моря Изобилия) составили 5.3 и 11.6 м соответственно.

Большинство образцов лунного реголита характеризуется бимодальным распределением частиц по размерам (Duke и др., 1970; King и др., 1972; Engelhardt и др., 1976; King, 1977). Например, в Море Кризисов лунный реголит характеризуется бимодальностью с максимумами около 1 мм и около 100 мкм (McCaу и др., 1978). Причиной бимодальности лунного реголита является смесь грубозернистой фракции из свежих выбросов и тонкозернистой фракции зрелого реголита, которые были недостаточно полно переработаны (измельчены) и перемешаны последующими метеоритными и микрометеоритными ударами (McCaу и др., 1978). Фактически бимодальность указывает на недостаточную сортировку частиц рыхлого реголита, которая по сравнению с земными рых-

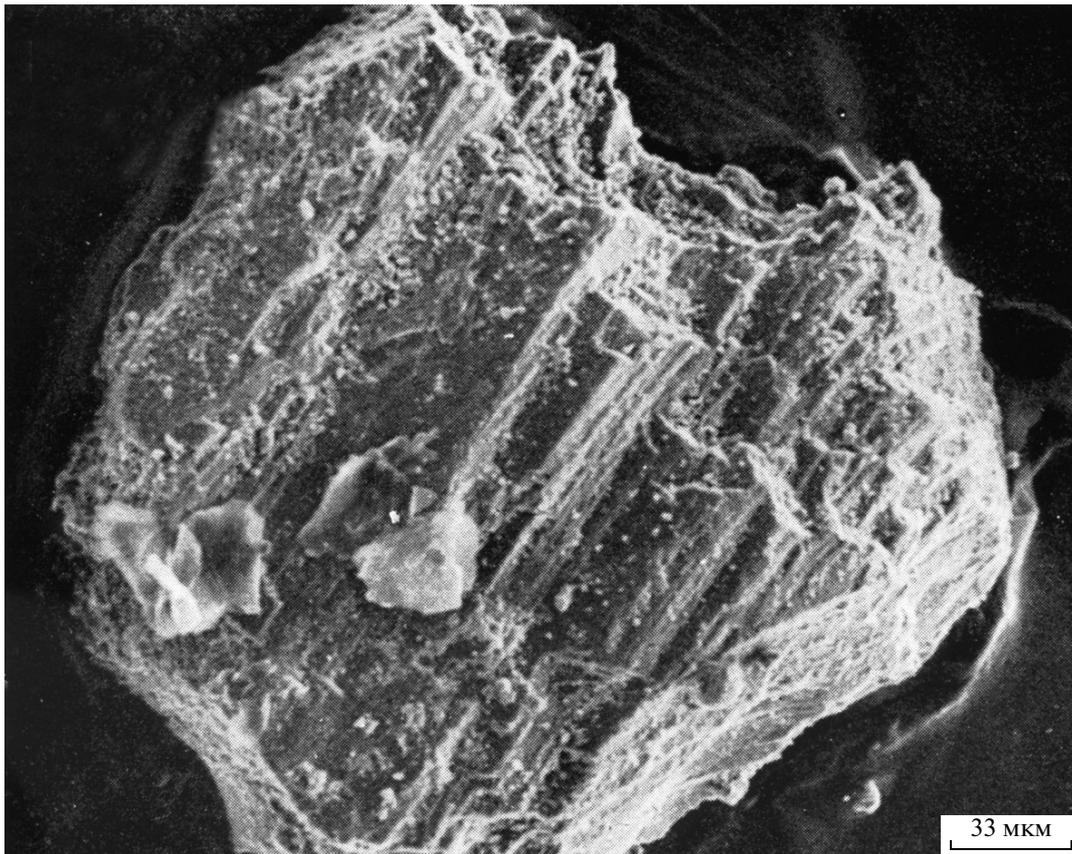


Рис. 5. Зерно плагиоклаза неправильной формы (Родэ и др., 1979). Луна-20, материковый район.

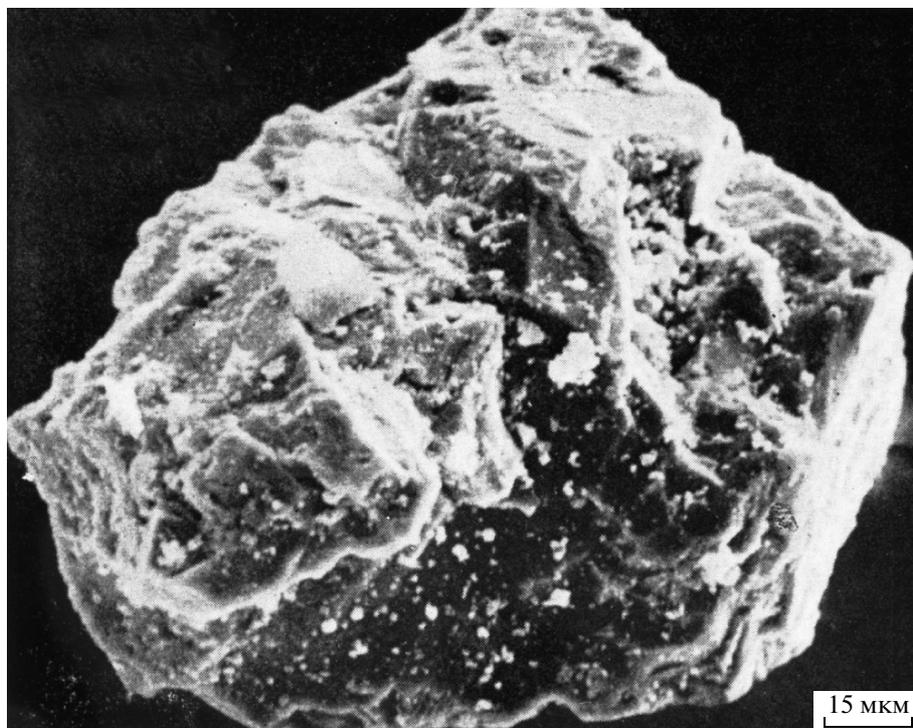


Рис. 6. Зерно оливина неправильной формы со сложным рельефом (Родэ и др., 1979). Луна-16, Море Изобилия.

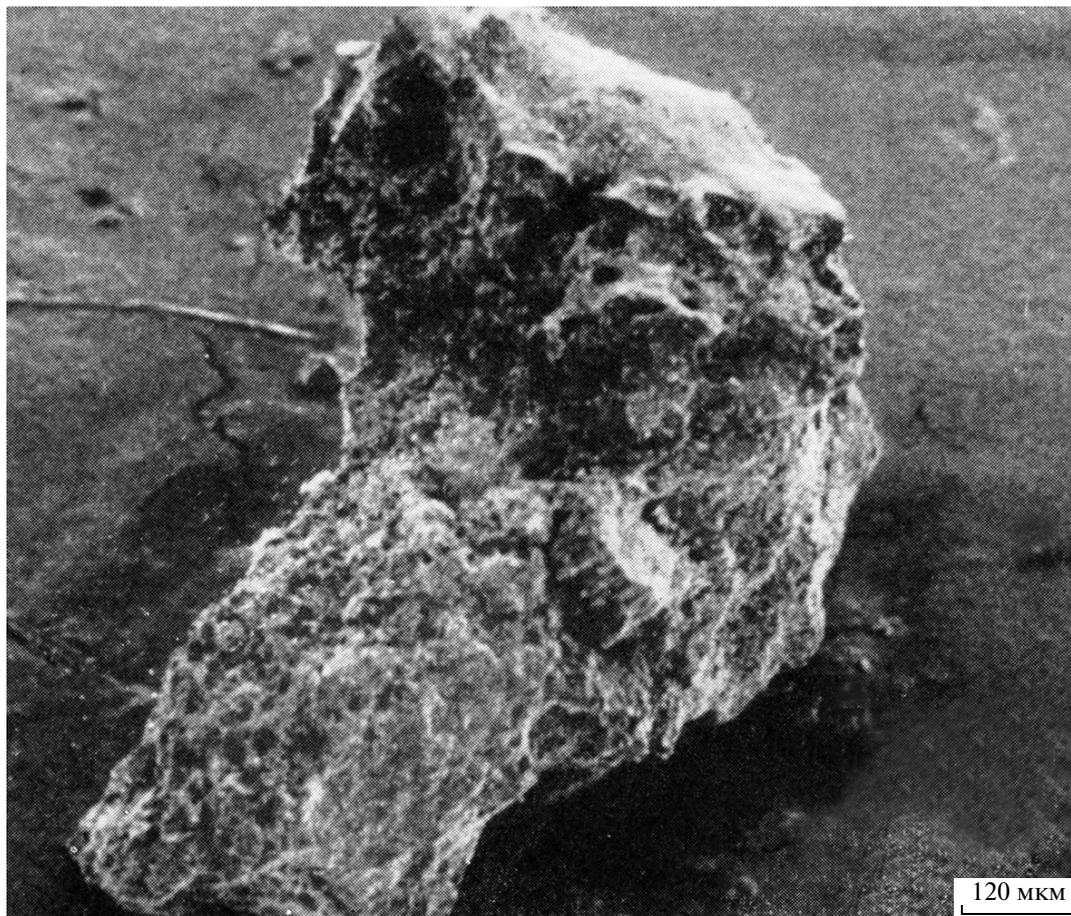


Рис. 7. Обломок брекчии неправильной формы со следами оплавления (Родэ и др., 1979). Луна-16, Море Изобилия.

лыми осадочными породами изменяется лишь в пределах от очень плохой до плохой.

Наблюдается хорошая корреляция между средним размером частиц реголита и логарифмическими стандартными отклонениями, которая описывается уравнением

$$M_z = a - b\sigma_i, \quad (3)$$

где M_z — средний размер частиц, выраженный в ϕ -единицах, σ_i — стандартное отклонение, также выраженное в ϕ -единицах (Butler, King, 1974). Зависимость параметров в разных регионах, отличающихся геолого-геоморфологическими особенностями, минеральным и химическим составом реголита, например в морских и материковых районах, изменяется (Стахеев, 1979). Следует отметить, что неучет фракций >1 мм при гранулометрическом анализе может приводить к значительному изменению числовых характеристик распределений и ослаблению связей между ними. Например, в грубозернистых образцах реголита, доставленного экспедицией Apollo-17 из Моря Ясности, содержится более 25% частиц размером от 1 мм до 1 см (McKay и др., 1974). Стандартное

отклонение характеризует степень сортировки реголита, — чем оно меньше, тем частицы ближе друг к другу по размерам. С уменьшением среднего размера частиц уменьшается и их стандартное отклонение, т.е. реголит становится все более монодисперсным и более зрелым, и значительно увеличивается количество агглютинатов (рис. 8), содержание которых в зрелом реголите достигает 50%. Зависимости параметров в исследованных материковых районах в местах посадок КА Луна-20 и пилотируемой экспедиции Apollo-16 оказались достаточно близкими, — $M_z = 7.89 - (1.55 \pm 0.36)\sigma_i$ и $M_z = 7.08 - (1.49 \pm 0.23)\sigma_i$ соответственно (Стахеев, 1979). Также высоким коэффициентом b , величина которого коррелирует со степенью зрелости грунта, отличается и материковый участок Фра Мауро (Apollo-14) — $M_z = 6.70 - (1.72 \pm 0.78)\sigma_i$. Зависимости размера частиц и стандартного отклонения в морских районах также оказались близкими между собой, но отличными от зависимости в материковых районах: Море Изобилия (Луна-16) — $M_z = 6.25 - (1.30 \pm 0.20)\sigma_i$, Море Дождей (Apollo-15) — $M_z = 6.14 - 1.33\sigma_i$, Море Ясности (Apollo-17) — $M_z = 76.14 - (1.00 \pm 0.10)\sigma_i$.

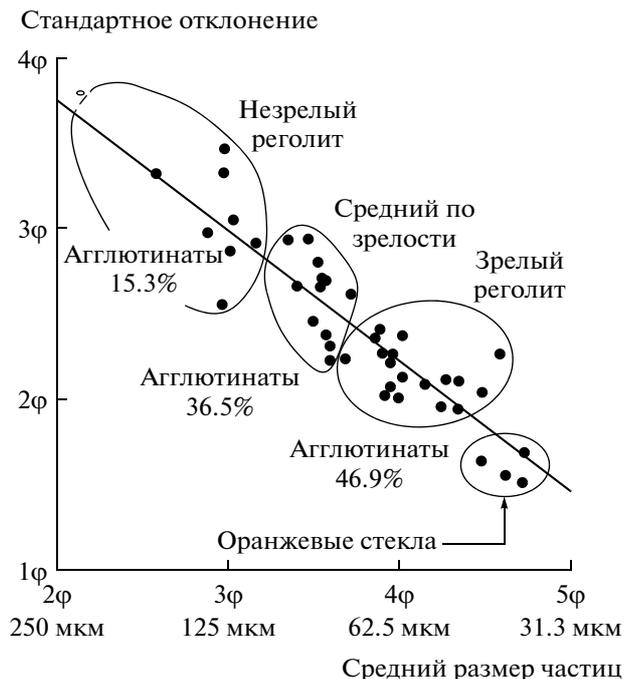


Рис. 8. Распределение среднего размера частиц реголита (M_z) в зависимости от стандартного отклонения (σ_i) для 42 образцов, доставленных из Моря Ясности экспедицией Apollo-17 (МакКау и др., 1974). С увеличением зрелости уменьшается средний размер частиц, растет количество агглютинатов и возрастает сортировка реголита (уменьшается стандартное отклонение). Оранжевые стекла — очень хорошо сортированные пирокластические отложения.

По гранулометрическим характеристикам типичный лунный реголит представляет собой плохо отсортированный песчано-алевритовый грунт с примесью щебня и глыб. Медианный размер частиц (средний размер частиц, разделяющий образцы реголита на две равных по весу фракции) изменяется в пределах от 40 до 130 мкм со средним значением 70 мкм (Carriger, 1973). Таким образом, примерно половина типичного лунного реголита по весу состоит из частиц, размер которых меньше разрешения человеческого глаза. Среднее стандартное отклонение крупнозернистой фракции составляет 2.5φ, что соответствует очень плохой сортировке. Среднее стандартное отклонение тонкозернистой фракции лишь незначительно меньше — 2.21φ, что также отвечает очень плохой сортировке фракции (Carriger, 1973).

Для количественной оценки распределения частиц в типичном лунном реголите рассмотрим данные для 21 образца реголита, доставленного экспедицией Apollo-17 (табл. 2).

Кумулятивное весовое содержание частиц в % больше заданного размера ($N_{>d}$ %) в типичном лунном реголите описывается уравнением (рис. 9)

$$N_{>d}\% = -23.205 \ln(d) + 143.586, \quad (4)$$

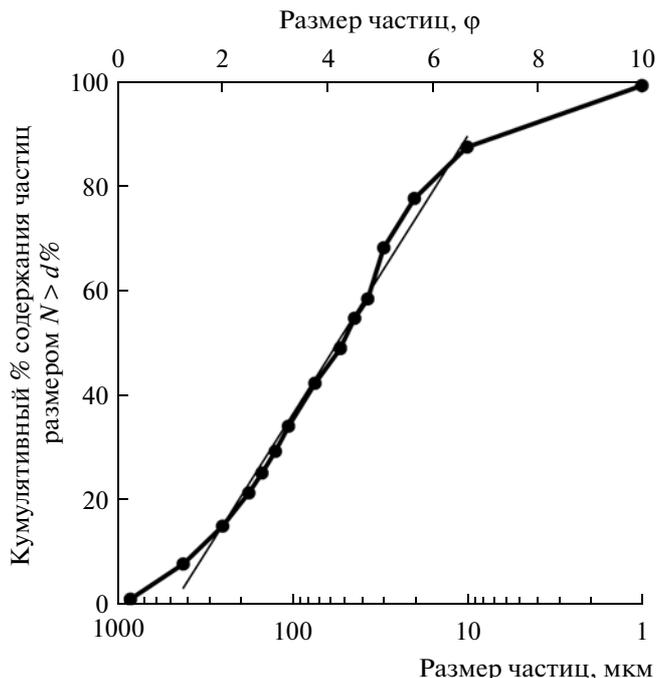


Рис. 9. Кумулятивное весовое содержание частиц больше заданного размера ($N_{>d}$) в %, в зависимости от их размера по суммарным данным для 21 образца реголита, доставленного экспедицией Apollo-17 (табл. 2). Тонкой сплошной линией показана аппроксимирующая кривая распределения частиц в диапазоне размеров от 420 до 10 мкм.

где d — размер частиц в микрометрах. Общее содержание частиц размером более 500 мкм и менее 20 мкм в типичном лунном реголите резко снижается (рис. 9). Расчетные и полученные в результате подсчета по 21 образцу реголита (табл. 3) эмпирические значения кумулятивного весового содержания частиц в диапазоне размеров от 500 до 10 мкм достаточно хорошо соответствуют друг другу, что указывает на достаточную надежность найденной математической модели (4) распределения частиц по размерам в типичном лунном реголите.

Размерный состав реголита с глубиной меняется от слоя к слою, где каждый слой характеризуется своей собственной текстурой и гранулометрией. По данным бурения на глубину до 236 см в месте посадки экспедиции Apollo-15 (Море Дождей), в стратифицированной колонке реголита было выделено 42 текстурных слоя, в которых медианный размер частиц изменялся от 44 до 89 мкм со средним значением около 50 мкм (Heiken и др., 1973; 1976). В целом наблюдается некоторое увеличение медианного размера частиц реголита с глубиной, т.е. с глубиной реголит становится более грубозернистым. Некоторое увеличение грубозернистости с глубиной наблюдается и в месте посадки экспедиции Apollo-16 на Равнинах Кэй-

Таблица 2. Вес в граммах ситовых размерных фракций образцов реголита, доставленных экспедицией Аполло-17 (Butler, King, 1974)

Образец, №	Ситовой размер частиц реголита, мкм														
	841	420	250	177	149	125	105	74	53	44	37	30	20	10	pan
72501.26	0.0030	0.0331	0.0350	0.0302	0.0156	0.0179	0.0226	0.0365	0.0321	0.0281	0.0216	0.0321	0.0326	0.0276	0.0248
73221.11	0.0073	0.0489	0.0392	0.0304	0.0154	0.0155	0.0188	0.0335	0.0251	0.0234	0.0138	0.0405	0.0357	0.0425	0.0721
73241.8	0.0172	0.0565	0.0430	0.0306	0.0124	0.0151	0.0202	0.0307	0.0254	0.0214	0.0121	0.0406	0.0424	0.0369	0.0672
73261.11	0.0092	0.0360	0.0386	0.0308	0.0160	0.0192	0.0218	0.0378	0.0323	0.0260	0.0228	0.0403	0.0406	0.0363	0.0681
73281.1	0.0080	0.0468	0.0382	0.0306	0.0169	0.0176	0.0180	0.0265	0.0256	0.0198	0.0209	0.0382	0.0459	0.0421	0.0378
74220.84	0.0011	0.0105	0.0176	0.0234	0.0150	0.0226	0.0226	0.0433	0.0373	0.0292	0.0168	0.0707	0.0506	0.0621	0.0507
75081.44	0.0100	0.0372	0.0386	0.0353	0.0220	0.0242	0.0285	0.0428	0.0328	0.0252	0.0223	0.0420	0.0422	0.0386	0.0296
76321.1	0.0186	0.0935	0.0992	0.0837	0.0788	0.0526	0.0594	0.1042	0.0921	0.0691	0.0212	0.1213	0.1067	0.1139	0.1643
76321.10F	0.0067	0.0450	0.0470	0.0456	0.0222	0.0249	0.0304	0.0525	0.0403	0.0369	0.0195	0.0648	0.0578	0.0634	0.0654
76501.21	0.0021	0.0306	0.0375	0.0310	0.0179	0.0204	0.0236	0.0385	0.0326	0.0247	0.0186	0.0496	0.0477	0.0441	0.0354
78221.8D	0.0178	0.0707	0.0888	0.0807	0.0452	0.0553	0.0707	0.1204	0.0932	0.0842	0.0453	0.1389	0.1370	0.1425	0.2143
78221.8C	0.0075	0.0370	0.0378	0.0366	0.0209	0.0251	0.0304	0.0558	0.0397	0.0298	0.0260	0.0576	0.0656	0.0784	0.0924
78421.19	0.0041	0.0215	0.0292	0.0290	0.0173	0.0214	0.0238	0.0434	0.0331	0.0305	0.0202	0.0529	0.0444	0.0529	0.0498
78441.12	0.0040	0.0221	0.0341	0.0295	0.0169	0.0235	0.0189	0.0391	0.0305	0.0299	0.0239	0.0495	0.0487	0.0436	0.0464
78461.11	0.0027	0.0206	0.0295	0.0251	0.0183	0.0206	0.0225	0.0395	0.0285	0.0305	0.0210	0.0480	0.0489	0.0484	0.0594
78481.27	0.0030	0.0212	0.0277	0.0293	0.0167	0.0195	0.0271	0.0461	0.0350	0.0284	0.0170	0.0436	0.0511	0.0512	0.0692
78501.25	0.0025	0.0271	0.0270	0.0233	0.0154	0.0138	0.0136	0.0314	0.0264	0.0252	0.0156	0.0478	0.0466	0.0550	0.0632
79221.17	0.0013	0.0259	0.0354	0.0316	0.0123	0.0205	0.0267	0.0393	0.0319	0.0286	0.0243	0.0455	0.0442	0.0502	0.0487
79241.17	0.0064	0.0318	0.0375	0.0270	0.0171	0.0165	0.0237	0.0362	0.0301	0.0264	0.0214	0.0416	0.0410	0.0513	0.0498
79261.23	0.0092	0.0362	0.0326	0.0303	0.0156	0.0202	0.0205	0.0335	0.0269	0.0231	0.0217	0.0541	0.0426	0.0468	0.0353
79511.7	0.0105	0.0401	0.0441	0.0331	0.0193	0.0220	0.0254	0.0411	0.0328	0.0289	0.0112	0.0344	0.0428	0.0327	0.0452

Таблица 3. Расчетное (модельное) и эмпирическое (табл. 2) весовое кумулятивное распределение частиц по размерам в типичном лунном реголите*

Ситовой размер частиц, мкм	Размер частиц, φ	Эмпирическое распределение, $N_{>d}\%$	Расчетное распределение, $N_{>d}\%$
10–1	9.97	100	—
10	6.64	88	90
20	5.64	78	74
30	5.06	69	65
37	4.76	59	60
44	4.51	55	56
53	4.24	50	51
74	3.76	43	44
105	3.25	35	36
125	3.00	30	32
149	2.75	26	27
177	2.50	22	23
250	2.00	15	15
420	1.25	8	3
841	0.25	1	—

* Расчетное значение справедливо только в диапазоне размеров от 500 до 10 мкм.

Таблица 4. Изменение пористости лунного реголита с глубиной (Carrier и др., 1991)

Интервал глубины, см	Средняя пористость, %
0–15	52 ± 2
0–30	49 ± 2
30–60	44 ± 2
0–60	46 ± 2

ли (Плато Декарта). Отобранная стратифицированная колонка реголита длиной 221 см состоит из 46 индивидуальных слоев, отличающихся текстурой (Allton, Waltz, 1980). За исключением верхнего слоя мощностью около 12 см, который отличается высокой степенью зрелости и представлен очень тонкозернистым реголитом, средний размер частиц от верхних слоев до нижних увеличивается с 85 до 200 мкм (McKay и др., 1977). Наблюдается и обратная зависимость. Например, в Море Кризисов в месте посадки КА Луна-24 в отобранной на глубине до 2 м стратифицированной колонке реголита средний размер частиц с поверхности на глубину уменьшается от 139 до 72 мкм (McKay и др., 1978). Таким образом, какой-либо единой закономерности изменения размерного состава с глубиной, по-видимому, не существует и все определяется конкретной геоло-

гической ситуацией и историей формирования слоя реголита не только в данном регионе, но и в данной локальной геологической ситуации.

ПЛОТНОСТЬ И ПОРИСТОСТЬ ЛУННОГО ГРУНТА

Удельная плотность (удельный вес) лунного реголита (грунта) зависит от его химического и минералогического состава. Она изменяется в достаточно широких пределах от 2.3 до более чем 3.2 г см⁻³ (Costes и др., 1970; Duke и др., 1970; Heywood, 1971; Cadenhead и др., 1972; 1974; Cadenhead, Jones, 1972; Carrier и др., 1973a; 1973b; Cadenhead, Stetter, 1975; Horai, Winkler, 1976; 1980). Например, удельная плотность агглютинатов и частиц реголита из стекла изменяется в пределах от 1.0 до >3.32 г см⁻³, удельная плотность базальтовых частиц, как правило, превышает 3.32 г см⁻³, а удельная плотность брекчиевых частиц реголита изменяется в узком диапазоне от 2.9 до 3.1 г см⁻³ (Duke и др., 1970). В качестве рекомендуемого среднего значения удельной плотности лунного реголита обычно принимается 3.1 г см⁻³ (Mitchell и др., 1972a).

Пористость лунного реголита определяется свободным пространством между отдельными частицами (межзерновая пористость) и открытым свободным пространством внутри частиц. Пористость оказывает прямое влияние на величину объемного веса реголита. Связь пористости лунного реголита (n) с его объемным и удельным весом определяется следующим аналитическим выражением (Carrier и др., 1991):

$$n = 1 - \rho / (G\rho_w) = 1 - \rho / 3.1, \quad (5)$$

где ρ — объемный вес реголита, ρ_w — плотность воды (1 г см⁻³), G — удельная плотность реголита. В верхнем слое реголита толщиной около 15 см средняя пористость превышает 50%, а в интервале глубины от 30 до 60 см пористость снижается до 44% (табл. 4).

При оценке физико-механических свойств лунного грунта часто используется так называемый коэффициент пористости, который обозначается либо индексом ε , либо e и определяется отношением:

$$\varepsilon = \frac{n}{1 - n}, \quad (6)$$

где n — пористость.

Пористость реголита в местах посадок экспедиций Apollo, измеренная по отпечаткам следов астронавтов, изменялась в пределах от 32 до 58%, т.е. от плотного до рыхлого. 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 по-

дошвой равно 7 кПа. В результате лабораторных наземных исследований было установлено, что при глубине следа в 1 см пористость грунта составляет около 45%, а при глубине в 10 см увеличивается до 54%. Высокая пористость реголита наблюдалась на валах кратеров, где она была в среднем выше пористости реголита в межкратерном пространстве на 2.5% и, в отличие от нее, изменялась в гораздо более широких пределах со стандартным отклонением 4.3 (табл. 5). В межкратерном пространстве, в отличие от валов кратеров, пористость изменяется в более узком диапазоне относительно среднего значения, равного 44% (табл. 5).

Объемный вес (плотность) и его изменение с глубиной является одной из важнейших и определяющих физико-механических характеристик лунного реголита. От объемного веса зависят все остальные не менее важные физико-механические, теплофизические, электромагнитные и общезфизические свойства. Объемный вес (ρ) определяется, прежде всего, химическим и минералогическим составом частиц реголита, т.е. прямо пропорционален удельному весу реголита и обратно пропорционален его пористости:

$$\rho = G\rho_w(1 - n), \quad (7)$$

где G – плотность реголита, ρ_w – плотность воды, n – пористость.

Объемный вес лунного реголита на поверхности до глубины 15 см определялся разными методами. Эксперименты, выполненные на Луноходе-1 и Луноходе-2, позволили получить представление о возможном многообразии механических свойств лунного грунта в естественном залегании на обширной площади. Измерения с помощью конусно-лопастного штампа проводились регулярно через 15–30 м пути. Более частое измерение проводилось в местах наиболее интересных геолого-геоморфологических образований. Всего было выполнено около 100 измерений на трассах общей протяженностью около 47 км. Приближенная оценка механических свойств лунного грунта по всей трассе движения луноходов также проводилась с помощью непрерывного измерения параметров взаимодействия ходовой части самоходного шасси с грунтом. По данным КА Луна-16, Луна-20 и Луноход-1, -2 объемный вес лунного реголита в слое толщиной до 10 см изменяется от 1.12 до 1.7 г см⁻³ со средним значением около 1.5 г см⁻³ (Леонович и др., 1971; 1974; 1975).

По отпечаткам следов астронавтов объемный вес поверхностного слоя реголита между кратерами составил 1.45–1.57 г см⁻³. На валах кратеров реголит был более рыхлым и объемный вес оказался несколько меньше – 1.34–1.57 г см⁻³ (Mitchell и др., 1974). Косвенный анализ по отпечаткам следов самоходной тележки (Apollo-15, -16 и -17) дал значе-

Таблица 5. Пористость реголита, измеренная по отпечаткам следов астронавтов во всех экспедициях Apollo (Mitchell и др., 1974)

Местоположение	Число наблюдений	Средняя пористость, %	Стандартное отклонение
Валы кратеров	89	46.5	4.3
Межкратерное пространство	687	44.0	2.75

Таблица 6. Изменение объемного веса лунного грунта с глубиной (Houston и др., 1974)

Интервал глубины, см	Средний объемный вес, г см ⁻³
0–15	1.50 ± 0.005
0–30	1.58 ± 0.05
30–60	1.74 ± 0.05
0–60	1.66 ± 0.05

ния объемного веса в слое до 15 см в пределах 1.40–1.56 г см⁻³ (Mitchell и др., 1974). При отборе стратифицированной колонки реголита с помощью механически внедряемой колонковой трубки были получены данные по объемному весу реголита до глубины 70 см. По данным Apollo-11 величина объемного веса составила в пределах 1.59–1.71 г см⁻³, по данным Apollo-12 и -14 – 1.55–1.9 г см⁻³ (Mitchell и др., 1972b). Точные прямые измерения плотности с помощью колонковых трубок были сделаны в местах посадок экспедиций Apollo-15, -16 и -17. В месте посадки Apollo-15 на глубину до 60 см плотность изменяется в пределах от 1.36 до 1.85 г см⁻³. Данные Apollo-16 и -17 показали изменение плотности на глубину до 60 см от 1.4 до 1.8 г см⁻³ и от 1.57 до 2.29 г см⁻³ соответственно. Таким образом, средняя плотность реголита в слое толщиной 30 см составила 1.58 г см⁻³, а в слое в интервале глубин от 30 до 60 см – 1.74 г см⁻³ (табл. 6). Среднее значение объемного веса лунного реголита на глубину до 15 см составляет 1.50 ± 0.05 г/см³, а до глубины 60 см – 1.66 ± 0.05 г см⁻³.

В местах посадки экспедиций Apollo-15, -16 и -17 (Море Дождей, Плато Декарта и Море Ясности) было проведено колонковое бурение на глубину 236, 224.3 и 305 см соответственно (табл. 7). Диаметр отобранного керна составлял 2.04 см. Буровой инструмент в экспедиции Apollo-15 состоял из 6 секций, которые делили отобранную колонку реголита на отдельные образцы по интервалам. Пять верхних секций и, соответственно, образцы реголита в этих секциях, имели длину 39.9 см. Самая нижняя секция имела длину 42.5 см. В этой

Таблица 7. Объемный вес образцов колонок реголита, отобранных в буровых скважинах в местах посадок экспедиций Apollo-15, -16 и -17 (Mitchell и др., 1972b; 1972c; 1973; Carrier, 1974)

Номер образца	Вес образца, г	Длина образца, см	Объемный вес образца, г см ⁻³	Глубина скважины, см
Apollo-15				
15006	210.6	39.9	1.62	236 ± 1
15005	239.1	39.9	1.84	
15004	227.9	39.9	1.75	
15003	223.0	39.9	1.79	
15002	210.1	39.9	1.62	
15001	232.8	37.0	1.93	
Apollo-16				
60007	105.7	22.2 ± 0.5	1.46 ± 0.03	224 ± 3
60006	165.6	35.5 ± 0.5	1.43 ± 0.02	
60005	76.1	Нарушена	—	
60004	202.7	39.9	1.56	
60003	215.5	39.9	1.66	
60002	211.9	}42.5	}1.75	
60001	30.1			
Apollo-17				
70009	143.3	25 ± 2	1.76 ± 0.14	305 ± 1
70008	260.9	38	2.11	
70007	179.4	34 ± 2	1.62 ± 0.10	
70006	234.2	39.9	1.80	
70005	240.6	39.9	1.85	
70004	238.8	39.9	1.84	
70003	237.8	39.9	1.83	
70002	207.7	}42.0	}1.74	
70001	29.8			

Таблица 8. Описание реголита для разных значений относительной плотности (Carrier и др., 1991)

Относительная плотность, D_R (%)	Описание реголита
0–15	Очень рыхлый
15–35	Рыхлый
35–65	Средний
65–85	Плотный
85–100	Очень плотный

секции длина образца реголита оказалась равной 37 см. Плотность определялась для каждого образца колонки реголита, соответствующего определенному интервалу глубины. Диапазон значений объемного веса по каждому интервалу менял-

ся от 1.62 до 1.93 г см⁻³ (Carrier, 1974). Средняя плотность реголита по всей скважине, т.е. на глубину 236 см, составила 1.76 г см⁻³. В буровой скважине в месте посадки экспедиции Apollo-16 от верхнего к нижнему интервалу глубины плотность увеличилась от 1.47 до 1.75 (среднее 1.59 г см⁻³). В буровой скважине в месте посадки экспедиции Apollo-17 плотность реголита, напротив, изменялась от 1.99 в верхнем интервале глубиной около 1 м до 1.74 г см⁻³ в нижнем интервале на глубине около 3 м. Среднее значение по скважине составило 1.87 г см⁻³ (табл. 7). Буровой инструмент состоял из 8 секций.

Среднее значение объемного веса реголита на поверхности может быть принято равным 1.3 г см⁻³, которое в верхнем слое в несколько сантиметров резко возрастает с глубиной. Глубже 60 см объемный вес реголита возрастает незначительно. Эмпирически найденная зависимость объемного веса реголита от глубины достаточно хорошо описывается выражением (рис. 10):

$$\rho = 1.92(z + 12.2)/(z + 18), \quad (8)$$

где z — глубина. Если $z = 0$, то объемный вес на поверхности равен 1.3 г/см³. С увеличением z объемный вес приближается к значению 1.92 г см⁻³, которое является наиболее оптимальным средним значением на глубине около 3 м (рис. 10).

Для модельных расчетов распределения объемного веса лунного грунта по глубине также удобно применять степенную зависимость плотности от глубины (рис. 10):

$$\rho = 1.39z^{0.056}. \quad (9)$$

Относительная плотность. Объемный вес (плотность) реголита может изменяться в широких пределах и в зависимости от пространственного расположения частиц относительно друг друга без их деформации и разрушения. Например, если идеальные частицы в виде шариков будут располагаться в гранцентрированной кубической упаковке, то в этом случае пористость будет равна 47.6%, а объемный вес с учетом удельного веса, равного 3.1 г см⁻³, будет равен 1.61 г см⁻³. В гексагональной упаковке минимальная пористость снизится до 26%, а объемный вес увеличится до 2.3 г см⁻³. Для описания степени рыхлости лунного реголита (Carrier и др., 1973b) используется так называемая относительная плотность (D_R), которая определяется выражением:

$$D_R = \rho_{\max}/\rho(\rho - \rho_{\min})/(\rho_{\max} - \rho_{\min}) \times 100\%, \quad (10)$$

где ρ — плотность лунного реголита, ρ_{\min} — минимальное значение плотности реголита, ρ_{\max} — максимальное значение плотности реголита. Если $\rho = \rho_{\min}$, тогда $D_R = 0\%$, и если $\rho = \rho_{\max}$, тогда $D_R = 100\%$ (табл. 8).

В верхнем слое реголита толщиной 15 см относительная плотность примерно равна 65%, резко увеличиваясь на глубине от 10 до 20 см (Houston и др., 1974). Естественное уплотнение лунного реголита по глубине из-за низкой силы тяжести незначительное. Например, на глубине 50 см при естественном уплотнении под действием только силы тяжести и веса вышележащего реголита грунт должен был иметь объемный вес около 1.3 г см^{-3} и относительную плотность 32%. Наблюдаемая плотность лунного грунта на этой глубине, равная 1.74 г см^{-3} (табл. 6), и относительная плотность — 83% (Houston и др., 1974) — предполагают, что лунный грунт неоднократно испытал нагрузку, превышающую 100 кПа. Такое чрезмерное уплотнение или переуплотнение реголита неглубоко от поверхности невозможно объяснить собственным весом грунта, т.е. силой тяжести. Очевидно, что основной причиной подобного резкого изменения относительной плотности с глубиной является мелкая метеоритная бомбардировка, которая взрыхляет поверхностный слой и, напротив, уплотняет нижележащие слои реголита (Carrier и др., 1973b). Фактически, изменение относительной плотности с глубиной является индикатором возраста отложений — чем древнее, тем плотнее.

КОГЕЗИЯ, УГОЛ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И АДГЕЗИЯ ЛУННОГО ГРУНТА

Когезионные силы сцепления (силы Ван дер Ваальса) между частицами рыхлого реголита проявляются в способности лунного грунта к слипанию и достижению определенной связности, в результате чего грунт может комковаться и держать вертикальные стенки небольшой высоты. По наблюдениям астронавтов число комков на поверхности доходило до 10% общего числа соразмерных камней. При этом комки легко раздавливались под подошвой астронавтов. При воздействии на грунт шасси лунохода происходило некоторое его уплотнение и выпирание в стороны. При разрушении грунт распадается на комки из мелкозернистого материала, образуя крутые неосыпающиеся стенки. При механическом воздействии на грунт образуются трещины, сколы и комки. Все это указывает на наличие заметных сил сцепления в грунте.

Лунный грунт в рыхлом состоянии имеет незначительное сцепление и малый угол внутреннего трения. По мере уплотнения грунта до объемного веса 1.5 г см^{-3} сопротивление сдвигу возрастает как за счет увеличения сил сцепления, так и за счет увеличения угла внутреннего трения. При дальнейшем уплотнении реголита выше 1.5 г см^{-3} угол внутреннего трения приближается к 25° , и дальнейший рост сопротивления сдвигу происходит в основном за счет увеличения когезии (Леон

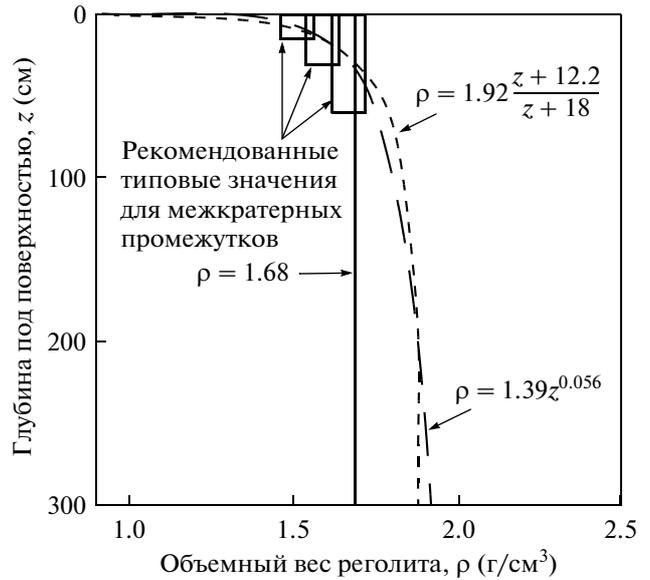


Рис. 10. Гиперболическая зависимость объемного веса (штриховая линия) лунного реголита от глубины (Carrier и др., 1991).

нович и др., 1974). По мере уменьшения степени уплотнения грунта его сопротивление сдвигу снижается. При объемном весе 1.29 г см^{-3} угол внутреннего трения снизился до $10^\circ\text{--}12^\circ$. Для прямолинейного участка зависимости (11) угол внутреннего трения и когезия для грунта, доставленного КА Луна-16 из Моря Изобилия, равен 25° и 5.1 кПа. Для грунта плотностью 1.61 г см^{-3} измеренный угол внутреннего трения равен 46° . Для грунта из материкового района, доставленного КА Луна-20, угол внутреннего трения равен 32° (Леонович и др., 1975). В процессе сдвига происходит изменение объема образца грунта. Если нормальное давление при сдвиге отсутствует, происходит разрыхление грунта и уменьшение его объемного веса. При нормальном давлении до 10 кПа объемный вес грунта практически не меняется. При давлениях выше 10 кПа во время сдвига происходит уплотнение грунта и его объемный вес возрастает (Леонович и др., 1974).

С помощью конусно-лопастного штампа (конического пенетрометра), установленного на Луноходе-1, по трассе лунохода протяженностью 5224 м у западного побережья Моря Дождей было выполнено 327 измерений механических свойств лунного грунта (Леонович и др., 1971). Было обнаружено, что механические свойства лунного грунта на равнине между кратерами, на валу кратеров и на внутренних стенках кратеров систематически и достаточно отчетливо различаются. С учетом измерений механических свойств лунного грунта, сделанных также Луноходом-2 в кратере Лемонье у восточного побережья Моря Ясности, для морских районов были получены следующие

Таблица 9. Типичные значения когезии и угла внутреннего трения лунного грунта на глубину до 60 см (Carrier и др., 1991)

Интервал глубины, см	Когезия, кПа		Угол внутреннего трения, град	
	среднее	интервал	среднее	интервал
0–15	0.52	0.44–0.62	42	41–43
0–30	0.90	0.74–1.1	46	44–47
30–60	3.0	2.4–3.8	54	52–55
0–60	1.6	1.3–1.9	49	48–51

Таблица 10. Плотность, когезия и угол внутреннего трения по экспериментальным данным (Jaffe, 1973)

Плотность, г см ⁻³	Когезия, кПа	Угол внутреннего трения, град
0.99	0.3	13
1.43	0.1	17
1.60	0.5	19
1.70	3.0	14
1.87	2.7	56

средние значения: когезия – 0.40 кПа, угол внутреннего трения – 40° и относительная плотность – 59%.

По данным, полученным КА Surveyor-3 и Surveyor-7, когезия лунного грунта в поверхностном слое до 10 см меняется в пределах от 0.35 до 0.70 кПа, а угол внутреннего трения – от 35° до 37° (Scott, Robertson, 1969). Пилотируемая экспедиция Apollo-11 подтвердила данные, полученный КА Surveyor (Costes и др., 1969). В то же время, измерения с помощью ручной колонковой трубки для отбора стратифицированной колонки реголита на глубину до 70 см дали более высокие значения когезии и угла внутреннего трения – 0.71–2.1 и 37°–45° соответственно (Costes и др., 1971). В экспедиции Apollo-14 измерения физико-механических свойств грунта с помощью заглубляемого ручного пенетromетра подтвердили данные, полученные КА Surveyor (Mitchell и др., 1971). Измерения в траншее дали значения когезии в пределах <0.03–0.1 кПа и угла внутреннего трения в пределах от 35° до 45° (Mitchell и др., 1971). Измеренный угол внутреннего трения с помощью самозаписывающего пенетromетра на глубину до 74 см в месте посадки экспедиции Apollo-15 оказался достаточно высоким и изменялся в пределах 47.5°–51.5° (Mitchell и др., 1972b). В материковом районе в месте посадки экспедиции Apollo-16 была пробурена скважина глубиной 224 см (табл. 7). После удаления бурового инструмента вертикальные стенки скважины сохранились без осы-

пания практически на всю ее глубину – до 218 см (Mitchell и др., 1972с), что оказалось возможным лишь при величине когезии лунного грунта не менее 1.3 кПа и угле внутреннего трения, равном 46.5°. Аналогичная оценка по стенкам скважины, пробуренной в месте посадки экспедиции Apollo-17, привела к значениям когезии лунного грунта, изменяющейся в пределах от 1.1 до 1.8 кПа (Mitchell и др., 1973).

В местах посадок экспедиций Apollo-15 и -16 измерения механических свойств лунного грунта также проводились с помощью ручного самозаписывающего конусного пенетromетра с максимальным его заглублением на глубину до 74 см. Всего было сделано 17 таких измерений, из них только 8 измерений на глубину ниже 20 см. Покрытые золотом цилиндры с механической записью эксперимента вынимались из пенетromетра и доставлялись на Землю (Mitchell и др., 1974; Mitchell, Houston, 1974). Средние измеренные значения когезии и угла внутреннего трения, полученные с помощью различных инструментов на глубину до 60 см на равнинах между кратерами, составляют 1.6 кПа и 49°. Распределение типичных значений когезии и угла внутреннего трения в интервале глубины до 60 см приведены в сводной табл. 9.

Экспериментальные исследования лунного грунта, доставленного с мест посадок пилотируемых экспедиций Apollo, также показали сильную зависимость когезии и угла внутреннего трения от плотности грунта и, соответственно, от глубины залегания (Jaffe, 1973) (табл. 10).

Достаточно сильная адгезия лунного грунта, которая проявляется в налипании грунта на любые соприкасающиеся с ним поверхности, была отмечена еще при посадке первых аппаратов на лунную поверхность. Во время всех пилотируемых экспедиций “Аполлон” лунный грунт налипал на детали инструментов и аппаратов и на скафандры астронавтов. По данным КА Surveyor-3 было обнаружено, что адгезия увеличивалась к концу лунного дня. В целом адгезия лунного грунта оценивается в пределах от 0.01 до 0.1 кПа (Jaffe и др., 1970).

ПРОЧНОСТЬ ЛУННОГО ГРУНТА НА СДВИГ

Прочность на сдвиг рыхлого грунта определяется классическим уравнением Мора–Коломба

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi, \quad (11)$$

где τ – сдвиговое напряжение в кПа, c – когезия, σ – приложенное нормальное напряжение, ϕ – угол внутреннего трения. Как следует из выражения (11), прочность на сдвиг состоит из двух основных компонентов. Один из компонентов определяется когезией и не зависит от приложенного напряжения. Второй фрикционный компо-

мент зависит от величины угла внутреннего трения и прямо пропорционален нормальному напряжению, т.е. напряжению, направленному перпендикулярно к поверхности. В соответствии с выражением (11) угол внутреннего трения может быть определен по формуле

$$\phi = \arctg\left(\frac{\tau - c}{\sigma}\right). \quad (12)$$

Характеристики сдвига лунного грунта существенно зависят от степени его уплотнения. От величины предела прочности на сдвиг зависят такие важные инженерные свойства рыхлого грунта, как несущая способность и величина угла естественного откоса (устойчивость откоса) рыхлого грунта, и, наконец, его транспортная проходимость.

Сопротивление сдвигу образцов лунного грунта определялось в плоскостном односрезном приборе по методу переуплотненного грунта. Параметры сопротивления сдвигу в большей степени зависят от уплотняющего давления, т.е. от нормального напряжения (рис. 11). По мере уменьшения степени уплотнения грунта его сопротивление сдвигу снижается.

По мере возрастания нормального напряжения происходит увеличение угла внутреннего трения и начального сцепления, что можно объяснить увеличением числа контактов между частицами и увеличением количества слипшихся частиц. При уплотняющих давлениях больше 40–50 кПа число контактов увеличивается незначительно, а увеличение углов внутреннего трения и начального сцепления приближается к некоторому постоянному значению. Стабилизация величины начального сцепления (когезии) объясняется тем, что в процессе сдвига при отсутствии нормального напряжения происходит разуплотнение грунта и взаимное зацепление между частицами уменьшается. При наличии нормального напряжения разуплотнения грунта в процессе сдвига не происходит, а при давлениях, больших некоторой величины, грунт при сдвиге уплотняется еще сильнее. Этим механизмом уплотнения объясняется линейный характер зависимости когезии (приведенного сцепления) от уплотняющего давления.

Величина напряжения сдвига достигает максимума при некотором значении деформации сдвига (Леонович и др., 1975). Резкого падения напряжений при возрастании деформаций не происходит, что свидетельствует о сохранении относительно постоянного среднего значения сил сцепления в грунте. Уменьшение напряжений сдвига наблюдается лишь при значительной величине деформации и объясняется в первую очередь уменьшением сечения образца. Нарастание напряжений сдвига от перемещения сдвига хоро-

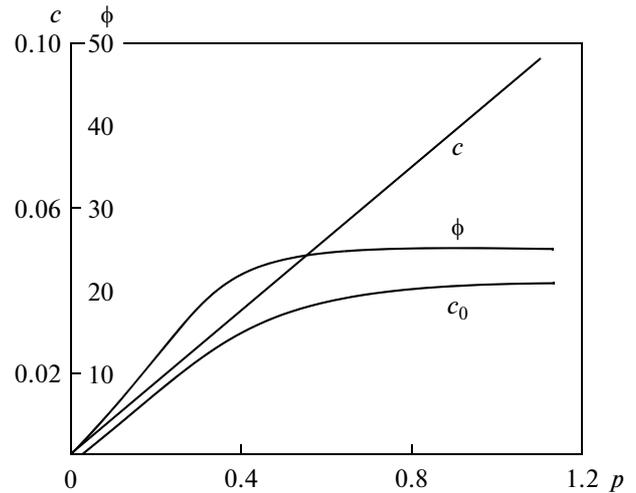


Рис. 11. Зависимость параметров сопротивления сдвига от нормального напряжения (Леонович и др., 1975): c_0 – начальное сцепление (когезия), $\times 10^2$ кПа; c – приведенное сцепление (когезия), $\times 10^2$ кПа; ϕ – угол внутреннего трения, град; σ – давление предварительного уплотнения, $\times 10^2$ кПа.

шо аппроксимируется показательной экспериментальной зависимостью:

$$\tau_s = \tau \left(\frac{s}{l}\right)^m, \quad (13)$$

где τ_s – текущее сопротивление сдвигу, кПа, τ – предельное сопротивление сдвигу, кПа, s – перемещение сдвига, l – характерный размер образца, m – показатель степени.

Экспериментальные исследования лунного грунта, доставленного пилотируемыми экспедициями Apollo, также показали сильную зависимость предела прочности на сдвиг лунного грунта от плотности (табл. 11).

Вместо уравнения Мора–Коломба (11) на основании обзора проведенных исследований было предложено использовать для оценки механиче-

Таблица 11. Предел прочности на сдвиг лунного грунта в зависимости от плотности по экспериментальным данным (Jaffe, 1973)*

Плотность, г см ⁻³	Прочность на сдвиг, кПа
0.99	0.021
1.43	0.062
1.60	0.070
1.70	0.31
1.87	0.28

* Предел прочности на сдвиг оценивался при нормальном напряжении 0.01 кПа.

Таблица 12. Изменение предела прочности на сдвиг лунного грунта по глубине

Глубина, см	Предел прочности на сдвиг, кПа
5	0.1–2.5
50	1–3.5
100	2–4
200	4–8
0–200	0.1–8

Таблица 13. Коэффициент сжимаемости образца лунного реголита, доставленного КА Луна-16 из Моря Изобилия (Леонович и др., 1974)

Интервал нормальных напряжений, кПа	Коэффициент сжимаемости
0–10	3.9
10–20	3.0
20–30	1.0
30–40	0.3
40–50	0.2

ских параметров лунного грунта следующее уравнение (Carrier, 1984):

$$\tau = a\sigma^b, \quad (14)$$

где нормальное напряжение (σ) представлено в кПа, постоянные коэффициенты $a = 1.83$, $b = 0.73$. В этом случае угол внутреннего трения будет равен

$$\phi = \text{tg}^{-1}(ab\sigma^{-b}), \quad (15)$$

а когезия

$$c = a(1 - b)\sigma^b. \quad (16)$$

Аналитическое уравнение предела прочности на сдвиг лунного грунта (14) хорошо согласуется с данными, полученными в результате измерений непосредственно на лунной поверхности в местах посадок пилотируемых экспедиций Apollo (Carrier и др., 1991) (табл. 12). При высоких нормальных напряжениях уравнение (14) дает хорошее соответствие с экспериментальными данными. Например, при $\sigma = 100$ кПа предел прочности на сдвиг (τ) будет равен 53 кПа, угол внутреннего трения $\phi = 21^\circ$, а когезия $c = 14$ кПа, что достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными по лунному грунту, доставленному КА Луна-16 и Луна-20 (Леонович и др., 1975).

СЖИМАЕМОСТЬ ЛУННОГО ГРУНТА

Сжимаемость лунного грунта также исследовалась на образцах лунного реголита, доставленных КА Луна-16 и Луна-20. Для исследования отбирались образцы грунта размером 6 см. Предельная величина уплотняющего давления достигала

100 кПа. В начальной стадии сжатия грунта уменьшение пористости происходит в основном за счет перемещения и более плотной укладки агрегатов и частиц. При дальнейшем увеличении нагрузки начинается разрушение агрегатов, перемещение и сближение собственно частиц, при этом нагрузка в массе грунта передается через контакты между частицами. При исследовании образцов реголита в диапазоне сжимающих давлений 0–32 кПа наблюдалась практически линейная зависимость между деформацией и давлением (Леонович и др., 1975). При дальнейшем уплотнении происходило резкое уменьшение сжимаемости грунта, а значения деформации приближались к некоторому предельно-плотному состоянию грунта (рис. 12). Удельный вес грунта принимался равным 3.0 г см^{-3} .

Коэффициент сжимаемости лунного грунта сильно зависит от величины уплотнения грунта (табл. 13). Для исследования уплотняемости лунного грунта проводились эксперименты по многократному внедрению штампа в одну точку. При повторных внедрениях штампа сопротивление грунта значительно возрастает. При этом несущая способность и сопротивление вращательному срезу увеличиваются в несколько раз. При оценке сжимаемости в качестве одного из параметров используется коэффициент пористости (ε), который определяется выражением (6).

Кривая сжимаемости (рис. 12) лунного реголита достаточно хорошо аппроксимируется выражением

$$\varepsilon = Ae^{-k_1\sigma} + Be^{-k_2\sigma}, \quad (17)$$

где ε – коэффициент пористости, A , B , k_1 , k_2 – постоянные коэффициенты. При этом $A + B = \varepsilon_0$ – коэффициент пористости предельно рыхлого грунта.

Для грунта, доставленного КА Луна-20 из материкового района Луны, уравнение кривой сжимаемости (рис. 12) представляется в следующем виде (Черкасов, Шварев, 1975):

$$\varepsilon = 0.98e^{-0.5\sigma} + 0.9e^{-0.1\sigma}. \quad (18)$$

Зависимость коэффициента сжимаемости (C_c) от приложенного напряжения и изменения коэффициента пористости может быть представлена также в следующем, более удобном виде (Carrier и др., 1972):

$$C_c = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta \lg \sigma_n} = -d\varepsilon/d \lg \sigma_n, \quad (19)$$

где $\Delta\varepsilon$ – отрицательное изменение коэффициента пористости, $\Delta \lg \sigma_n$ – логарифм изменения нормального напряжения. Измеренный коэффициент сжимаемости лунного грунта, доставленного экспедицией Apollo-12, в зависимости от плотности грунта изменяется от 0.01 до 0.11 (табл. 14).

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ
ЛУННОГО ГРУНТА

Самый верхний слой грунта представляет собой пылевидный легко деформируемый материал, поскольку при воздействии на глубину до 1 см грунт уплотняется без заметных выпираний в стороны. При движении лунохода по прямой глубина колеи изменялась от 1 до 5 см, при движении на крутых подъемах глубина колеи из-за буксования увеличивалась. Особенно сильное разрушение грунта происходило при повороте лунохода, когда глубина колеи увеличивалась до 10 см (Леонович и др., 1971).

Конусно-лопастной штамп, установленный на Луноходе-1 и Луноходе-2, позволял одновременно в одной точке определять параметры несущей способности и уплотняемости грунта, а при повороте штампа – сопротивление вращательному срезу грунта (Леонович и др., 1971; 1975). Всего было выполнено около 1000 измерений на трассах общей протяженностью 47 км. Глубина проникновения штампа в грунт достигала 100 мм. Параметры несущей способности определялись по кривым внедрения штампа в грунт, т.е. в зависимости от нагрузки на штампе и глубины его погружения в грунт. В качестве оценочного параметра несущей способности принималось удельное давление на штамп при глубине внедрения в грунт, равной высоте штампа. Несущая способность лунного грунта оказалась на валу некоторых кратеров заметно ниже, чем на горизонтальном участке и склоне кратера. В целом, по трассе Лунохода-1 несущая способность в разных местах изменялась от 19.6 до 98 кПа. Несущая способность самого верхнего слоя глубиной до 1 см оказалась достаточно малой, равной 2–3 кПа.

Сопротивление вращательному срезу в местах измерений по трассе Лунохода-1 изменялось в пределах от 2 до 9 кПа. Для исследования механических характеристик грунта на некоторой глубине осуществлялся многократный разворот лунохода на месте. В результате разворота снимался верхний слой грунта толщиной 8–10 см. Несущая способность вскрытого грунта обладала более высокими механическими свойствами по сравнению с грунтом на поверхности и составляла 100 кПа, а сопротивление вращательному срезу – 6 кПа.

В целом, вдоль трассы Лунохода-1 грунт оказался достаточно прочным для уверенного движения. На горизонтальных участках коэффициент буксования ведущих колес из-за неровностей поверхности и неоднородности реголита изменялся в пределах от 0 до 15%. На склонах кратеров буксование увеличивалось до 20–30%. Тягово-цепные качества обеспечили уверенное движение лунохода по склонам до 20°.

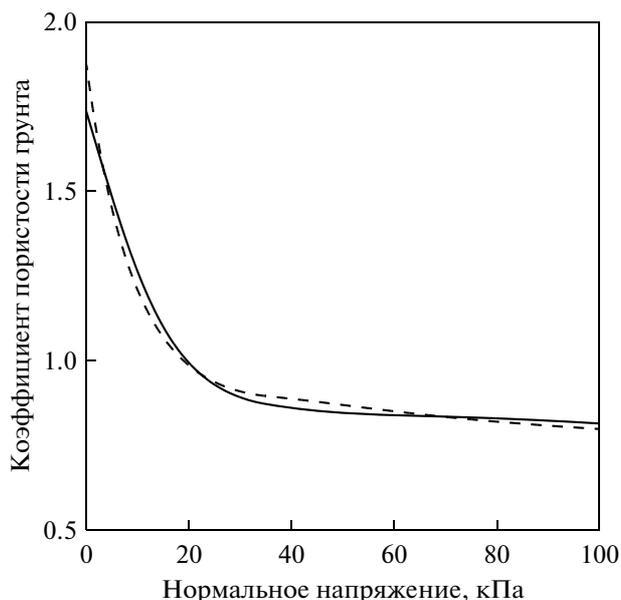


Рис. 12. Сжимаемость лунного грунта в зависимости от нормального напряжения по данным (Леонович и др., 1975). Сплошная линия – лунный реголит из Моря Изобилия (КА Луна-16), прерывистая линия – лунный грунт из материкового района Луны (КА Луна-20).

Экспериментальные данные по исследованию доставленных образцов грунта достаточно хорошо описываются смещенным уравнением Релея

$$f(q) = 2\lambda(q - q_0)e^{-\lambda^2(q - q_0)^2}, \quad (20)$$

где $f(q)$ – плотность вероятности несущей способности, q – значение несущей способности, q_0 – минимальная величина несущей способности, λ – степень неоднородности свойств грунта. Величина q_0 в значительной мере определяется размерами штампа и глубиной проникновения в грунт. С уменьшением размеров штампа q_0 также будет уменьшаться. Параметры q_0 и λ в уравнении могут быть определены по величине математического

Таблица 14. Коэффициент сжимаемости лунного реголита по данным (Carrier и др., 1972; Jaffe, 1973; Леонович и др., 1974; 1975)

Экспедиция	Интервал плотности, г см ⁻³	Интервал нормальных напряжений, кПа	Коэффициент сжимаемости (C_c)
Apollo-12	1.67–1.82	0.08–67.5	0.04–0.11
	1.84–1.92	0.09–31.2	0.012–0.062
	1.91–2.00	1.90–69.9	0.03–0.09
Apollo-12	1.29–1.60	0.12–28.0	0.21
	1.40–1.64	0.14–28.0	0.11
	1.58–1.68	0.14–28.0	0.04
Луна-16	1.03–1.51	0.05–98.0	0.3
Луна-20	0.98–1.51	0.05–98.0	0.3

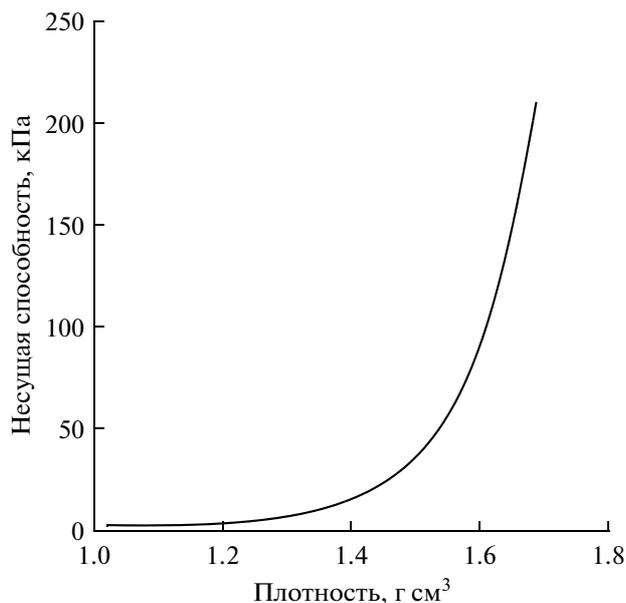


Рис. 13. Распределение несущей способности лунного реголита в зависимости от объемного веса по данным (Леонович и др., 1975).

ожидания и дисперсии. Средние значения этих коэффициентов составляют $q_0 = 8$ кПа, $\lambda = 300$ кПа. Модальное значение несущей способности равно 35 кПа (Леонович и др., 1975).

Несущая способность доставленных образцов лунного грунта также исследовалась с помощью внедряемого штампа в образцы грунта, доставленного КА Луна-16 и Луна-20. При внедрении в грунт, находящийся в предельно рыхлом состоянии, штамп оставляет четкий отпечаток, вокруг которого поверхность грунта не деформируется. С увеличением плотности грунта сопротивление внедрению штампа заметно возрастает. В области с объемным весом грунта <1.4 г см⁻³ основную роль в деформации грунта играет сжимаемость грунта (рис. 13). При увеличении объемного веса более $1.4-1.5$ г см⁻³ наблюдается резкий рост несущей способности. При сильном уплотнении (<1.6 г см⁻³) деформация грунта происходит за счет общего сдвига. При внедрении в сильно уплотненный грунт с объемным весом >1.6 г см⁻³ ход кривой осадки штампа изменяется и соответствует деформации грунта при предельном рав-

Таблица 15. Модуль деформации лунного грунта в зависимости от его объемного веса

Объемный вес реголита, г см ⁻³	Модуль деформации, кПа
1.12	15.3
1.29	28.4
1.45	83.4
1.62	235.4

новесии (рис. 13). Экспериментальная зависимость несущей способности (q) лунного грунта от объемного веса (ρ) (рис. 13) достаточно хорошо аппроксимируется уравнением

$$q = 0.00057e^{7.44\rho}. \quad (21)$$

Таким образом, несущая способность в значительной мере определяется углом внутреннего трения, который для лунного грунта может изменяться в широких пределах в зависимости от степени уплотнения грунта, характера и величины внешней нагрузки.

Несущая способность лунного грунта, оцененная по 776 отпечаткам следов астронавтов на луне в местах посадок всех пилотируемых экспедиций Apollo, описывается следующим аналитическим выражением (Mitchell и др., 1974):

$$q_{\text{all}} = kd_{\text{acc}}, \quad (22)$$

где d_{acc} — величина просадки грунта под нагрузкой, k — так называемый модуль реакции (коэффициент реакции) грунта. Модуль или коэффициент реакции грунта был найден статистически с учетом данных по всем отпечаткам при известной нагрузке q (7 кПа) и глубине отпечатка (просадки грунта) d . Полученное среднее значение $k = 8$ кПа см⁻¹.

Предельной несущей способностью лунного грунта является максимальная допустимая нагрузка, при которой не происходит опрокидывания объекта на лунной поверхности. Для опоры шириной 1 м предельная несущая способность лунного реголита оценивается в 6 МПа. Предельная несущая способность зависит от плотности грунта, прочности грунта на сдвиг и от размеров и формы опоры (Durgunoglu, Mitchell, 1975).

МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ЛУННОГО ГРУНТА

Модуль общей деформации лунного грунта, доставленного из Моря Изобилия КА Луна-16, исследовался с помощью плоского штампа диаметром 8 мм (Леонович и др., 1974). При внедрении в грунт с объемным весом 1.12 г см⁻³, находившимся в предельно рыхлом состоянии, штамп оставлял четкий отпечаток, вокруг которого образовались небольшие кольцевые трещины. Выпираание грунта вокруг штампа не наблюдалось. С увеличением плотности грунта сопротивление внедрению штампа заметно возрастало. Изменялся также характер деформации грунта, появлялись зоны выпирания вокруг штампа, образовывались радиальные и концентрические трещины. С увеличением объемного веса лунного реголита модуль деформации резко возрастает (табл. 15). Таким образом, в соответствии с распределением объемного веса грунта по глубине модуль деформации в поверхностном слое реголита оценивает-

ся в пределах 15–29 кПа, а в интервале глубин 30–60 см (табл. 6) и глубже – ~240 кПа.

При снятии сжимающей нагрузки с образца грунта его коэффициент пористости практически не меняется, так как восстанавливающиеся деформации грунта невелики и составляют в среднем десятые доли процента от остаточной деформации. При возрастании нагрузки до прежнего значения происходит дополнительная осадка грунта, величина которой уменьшается по мере увеличения нормального напряжения. При повторном многократном приложении нагрузки дополнительная осадка грунта уменьшается по мере увеличения числа циклов нагружений.

Модуль общей деформации также оценивался по отпечаткам следов астронавтов и опорных шасси лунных модулей пилотируемых экспедиций Apollo. При глубине следа в 1 см модуль общей деформации оценивался в 135 кПа, а при глубине следа в 10 см – в 13 кПа (Черкасов, Шварев, 1975). Статическая нагрузка на опору шасси лунного модуля составляла 270 кг, а ее диаметр – 63 см. Глубина вдавливания опор лунного модуля изменялась от 2.5 до 7.5 см, что соответствовало изменению модуля общей деформации в пределах 55–165 кПа.

КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА ЛУННОГО ГРУНТА

Коэффициент поперечной деформации, или коэффициент Пуассона (μ), является показателем способности породы к изменению объема в процессе деформации под действием напряжений и определяется абсолютной величиной отношения относительной поперечной деформации $\left(\frac{\Delta b}{b}\right)$ к относительной продольной деформации $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)$.

Коэффициент Пуассона главных породообразующих минералов изменяется в небольших пределах: от 0.08 до 0.34, при этом наиболее многочисленной является группа минералов, для которых коэффициент изменяется от 0.21 до 0.29. Коэффициент Пуассона также зависит от минералогического состава, трещиноватости и пористости горных пород. Для мерзлых песчано-глинистых грунтов коэффициент Пуассона изменяется от 0.13 до 0.45 (Цытович, 1973). При понижении температуры грунтов этот коэффициент понижается, а при повышении – увеличивается (Трофимов и др., 2005).

При обработке опытных данных, полученных КА Surveyor, в расчетах использовалось значение коэффициента Пуассона $\mu = 0-0.5$ (Choate и др., 1969), что перекрывает значения для всех известных земных материалов. При расчете модуля общей деформации грунта Apollo-12 значение ко-

эффициента Пуассона принималось равным 0.2 (Scott, Zuckerman, 1971). Среднее значение коэффициента Пуассона для лунного грунта оценивается в 0.2 (Черкасов, Шварев, 1975).

При изучении процессов деформации грунта Луны-16 и -20 на приборе Кулона был рассчитан коэффициент бокового расширения лунного грунта (ξ), который связан с коэффициентом Пуассона (μ) выражением:

$$\xi = \mu / (1 - \mu); \quad \mu = \xi / (1 + \xi). \quad (23)$$

Рассчитанное по этой формуле значение коэффициента Пуассона составляет 0.31 для грунта Луны-16 и 0.20 для грунта Луны-20 (Громов и др., 1979).

МОДЕЛЬНЫЕ АНАЛОГИ ЛУННОГО ГРУНТА

Практически невозможно создать модель лунного грунта на основе земных горных пород, которая бы соответствовала всем требуемым свойствам лунного грунта – физико-механическим, теплофизическим, электромагнитным, химическому и минералогическому составу и т.д. Поэтому все аналоги и модели лунного грунта изготавливаются, как правило, с целью имитации одного–двух основных свойств, необходимых для исследования, моделирования и проведения экспериментов. Все имитаторы разработаны на основе механического измельчения горных пород. С целью большего соответствия гранулометрического состава и обломочной формы частиц дробление горных пород производится преимущественно ударным способом. По своему гранулометрическому составу большинство моделей также отличается от типичного лунного грунта и в целом могут соответствовать лишь крупнозернистой фракции лунного реголита, поскольку более глубокое измельчение связано со значительными затратами и применением дорогостоящих технологий. Для создания аналогов морского лунного грунта в качестве исходных горных пород обычно используются породы базальтового состава. Для имитации материковых грунтов используются анортозиты с добавлением оливина и пироксена. Для имитации в грунте фазы агглютинатов, которая присутствует в лунном реголите в значительном количестве, в модельный грунт при необходимости добавляется стекло.

MLS-1 (Minnesota Lunar Simulant 1). Имитатор, разработанный в университете Миннесоты (США) на основе полнокристаллических магматических горных пород основного состава (высоко-титанистых амфиболовых фельзитов), добываемых в карьере Дулут в Миннесоте. Состоит из плагиоклаза, оливина, пироксена и ильменита, не содержит стекла. По гранулометрическому составу имитатор соответствует образцу морского грунта 10084, доставленному Apollo-11 (Weiblen и др., 1990; Batiste, Sture, 2005).

Таблица 16. Физико-механические свойства лунного грунта

Характеристики		Численное значение
Плотность грунта	Поверхностный слой	1.3 г/см ³
	На глубине 15.0 см	1.5 г/см ³
	На глубине 60 см	1.66 г/см ³
	На глубине 200 см	1.9 г/см ³
Изменение плотности	До глубины 200 см	$\rho = 1.92(z + 12.2)/(z + 18)$
Пористость грунта	Поверхностный слой 0–15 см	52 ± 2%
	На глубине 30–60 см	44 ± 2%
Изменение пористости	До глубины 200 см	≤40%
Содержание (%) частиц больше заданного размера в типичном лунном реголите $N_{>d}\% = -23.205 \ln(d) + 143.586$	>841 мкм	1%
	>250 мкм	15%
	>105 мкм	35%
	>53 мкм	50%
	>20 мкм	78%
Модуль деформации грунта	Поверхностный слой	15.6–29 кПа
	На глубине до 200 см	240 кПа
Изменение модуля деформации	До глубины 200 см	15.6–240 кПа
Коэффициент Пуассона грунта (среднее значение)	До глубины 200 см	0.2
	Прочность грунта на сдвиг	
	На глубине 5 см	0.1–2.5 кПа
	На глубине 50 см	1–3.5 кПа
	На глубине 100 см	2–4 кПа
	На глубине 200 см	4–8 кПа
Изменение прочности грунта на сдвиг	До глубины 200 см	0.1–8 кПа
	Когезия частиц (среднее значение)	
	На глубине 0–15 см	0.52 кПа
	На глубине 10–20 см	0.6 кПа
	На глубине 0–30 см	0.90 кПа
	На глубине 30–60 см	3.0 кПа
	На глубине 0–60 см	1.6 кПа
Изменение когезии частиц	До глубины 200 см	0.1–3.5 кПа
Изменение угла внутреннего трения	До глубины 200 см	30°–50°

MLS-2 (Minnesota Lunar Simulant 2). Имитатор материкового лунного грунта, изготовленный из анортозита габбрового комплекса Дулут (США) (Weiblen и др., 1990; Batiste, Sture, 2005).

JSC-1 (Johnson Space Center 1). Имитатор разработан в космическом центре Джонсона (США) как имитатор среднего состава морского реголита с низким содержанием титана и высоким содержанием стекла. Модификации JSC-1A 1AF, 1AC. JSC-1A – стандартный, наиболее часто используемый в NASA имитатор лунного морского реголита. Он имеет размер частиц 1 мм и менее. JSC-1A изготавливается путем ударного дробления отложений вулканического пепла, добываемого на вулканическом поле Сан-Франциско, район Флагстафф, Аризона. JSC-1AC – аналогичный по составу грубозернистый имитатор с размером частиц <5 мм. JSC-1AF – тонкозернистый имитатор со средним размером частиц 27 мкм. По гранулометрическому и химическому составу имитатор

довольно близок к лунному реголиту (McKay и др., 1993; 1994).

MKS-1. Имитатор низкотитанистого морского грунта (США) (Carpenter и др., 2006).

NU-LHT. Имитатор, разработанный в США (NASA и USGS). Воспроизводит химические, минералогические и физические свойства материкового реголита. NU-LHT содержит стекло и плагиоклаз и по концентрации FeO (4–5 мас. %) приближается к типичному материковому грунту (Stoeser и др., 2010a; Zeng и др., 2010).

GRC-1 (Glenn Research Center, США). Имитатор, разработанный для испытания мобильных и грунтозаборных устройств. Состоит из смеси глины и песка (Oravec и др., 2010).

BP-1 (Kennedy Space Center/Arizona Black Point, США) – измельченный базальт, имитатор низкотитанистого базальтового по составу лунного грунта, используемый для крупномасштаб-

ных испытаний прототипов горнодобывающей техники (Stoeser и др., 2010b).

ALS (Arizona Lunar Simulant, США). Имитатор низкотитанистого лунного грунта, применяется для геотехнологических исследований (Desai и др., 1993).

GCA-1 (Goddard Space Center, США) – имитатор низкотитанистого лунного грунта, применяется для геотехнологических исследований (Taylor, Liu, 2010).

FJS-1 (Fuji Japanese Simulant). Имитатор разработан в Японии. Изготавливается из базальтов, добываемых в окрестностях вулкана Фудзи. FJS-1 – имитатор низкотитанистого морского грунта Apollo-14 (Kanamori и др., 1998a; 1998b).

FJS-2 (Fuji Japanese Simulant). Подобен FJS-1, но отличается повышенным содержанием оливины, более точно воспроизводит свойства грунта Apollo-14 (Kanamori и др., 1998a; 1998b).

FJS-3 (Fuji Japanese Simulant). Имитатор высокотитанистого морского грунта, получен путем добавления оливины и ильменита в материал имитатора FJS-1, по свойствам близок к реголиту Apollo-11 (Kanamori и др., 1998a; 1998b).

CLRS-1, -2 (Chinese Lunar Regolith Simulant). Имитаторы общего назначения, разработанные в Китайской академии наук. Воспроизводят свойства низкотитанистых и высокотитанистых морских базальтов, изготовлены путем измельчения и смешения базальтов нескольких типов, 95% составляют частицы размером менее 1 мм, 50% – менее 0.1 мм (www.sxkp.com).

CUG-1. Китайский технологический имитатор низкотитанистого морского базальта (He и др., 2010).

NAO-1 (National Astronomical Observatories). Имитатор материкового реголита, разработан в Китайской академии наук (Li и др., 2009).

TJ-1, TJ-2 (Tongji University). Геотехнический имитатор низкотитанистого базальтового реголита, разработан в университете Тонжи (КНР); изготовлен из базальтового пепла с добавлением оливины и стекла (Jiang и др., 2010; 2012).

OB-1. Канадский имитатор материкового реголита, содержит оливин и битовнит, предназначен для общего и геотехнологического применения (Battler, Spray, 2009).

В СССР в качестве имитатора лунного грунта предлагалось использовать армянские вулканические туфы и шлаки (Ацагорцян и др., 1972). Верхний, рыхлый слой реголита предлагалось имитировать вулканическим шлаком, а нижний слой реголита – дробленным вулканическим туфом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лунный грунт в предельно рыхлом состоянии имеет очень низкие прочностные характеристики и обладает высокой сжимаемостью. По характеру поведения грунт при приложении нагрузки в этом состоянии приближается к свойствам сжимаемой жидкости, т.е. имеет малый угол внутреннего трения, характеризуется незначительной когезией и большим коэффициентом бокового давления. При уплотнении грунта (уменьшении коэффициента пористости) происходит увеличение сцепления и угла внутреннего трения, резко уменьшается коэффициент сжимаемости и увеличивается несущая способность.

От района к району физико-механические свойства реголита на поверхности могут изменяться в значительной степени, что обусловлено, главным образом, вариациями гранулометрического состава и плотности в зависимости от геоморфологического типа местности. Прежде всего, такое различие наблюдается в межкратерной области и на рыхлых валах относительно свежих кратеров диаметром в десятки и сотни метров. Несущая способность лунного грунта на валу некоторых кратеров примерно в пять раз ниже, чем на горизонтальных участках и склонах кратера. Например, по трассе Лунохода-1 несущая способность в разных местах изменялась от 19.6 до 98 кПа. Сопротивление вращательному срезу в местах измерений по трассе Лунохода-1 изменялось в пределах от 2 до 9 кПа. Соответственно, и коэффициент буксования ведущих колес на горизонтальных участках изменялся в пределах от 0 до 15%. На склонах кратеров буксование увеличивалось до 20–30%.

Основные физико-механические свойства лунного грунта представлены в сводной табл. 16. Наиболее полно исследованы физико-механические свойства лунного грунта на поверхности, т.е. для наиболее рыхлого поверхностного слоя. Относительно хорошо известны физико-механические свойства и их изменение на глубину до 60 см. Очень немного данных о физико-механических свойствах на глубину до 2 м и почти ничего не известно о грунте на глубинах более 2 м. Практически отсутствуют данные о физико-механических свойствах лунного грунта с различным содержанием замороженных летучих в полярных областях, характеризующихся постоянной низкой температурой. Таким образом, необходимо исследование всех основных параметров физико-механических свойств *in situ* до глубины нескольких метров, а в некоторых случаях и до подошвы рыхлого слоя реголита, т.е. до подстилающих пород. Важной научной и практической задачей будущих лунных экспедиций и миссий является исследование физико-механических свойств лунного грунта в полярных областях, и прежде всего на участках с содержанием замороженных летучих.

На снимках высокого разрешения лунной поверхности по данным АМС Lunar Reconnaissance Orbiter на стенках некоторых крупных кратеров были обнаружены протяженные свежие оползни или “потоки” лунного реголита, экспозиционный возраст которых оценивается от нескольких десятков до нескольких лет (Лу, Шевченко, 2012; Шевченко и др., 2012). Протяженность потоков и их тонкозернистый гранулометрический состав предполагают небольшой угол трения и относительно невысокую плотность этих образований, которые оцениваются примерно в 20° и 1.5 г см^{-3} соответственно (Shevchenko и др., 2011). Образование таких протяженных потоков на относительно пологих склонах (10° – 20°), вероятно, может быть связано с лунотрясениями, наиболее вероятными источниками которых являются метеоритные удары и образование ударных кратеров размером от нескольких метров до нескольких сотен метров. Очевидно, что физико-механические свойства этих очень свежих и рыхлых образований могут существенно отличаться от типичного лунного реголита.

Установление количественной зависимости между напряжениями и соответствующими им деформациями является одним из важнейших вопросов в механике рыхлых грунтов. В общем случае эти зависимости являются нелинейными, определяются большим числом факторов и практически не поддаются теоретическому исследованию и численному моделированию. Поэтому для каждого из рыхлых материалов, в том числе и для лунного грунта, основные зависимости между напряжениями и соответствующими им деформациями устанавливаются только экспериментальным путем. Зависимости модуля общей деформации и несущей способности лунного грунта, а также модуля деформации и предела прочности на сдвиг, опытным путем не исследовались и, соответственно, такие прямые модельные зависимости пока не определены. Упругость у рыхлых грунтов проявляется лишь при незначительных напряжениях, превышение которых приводит к пластической деформации. Соответственно, неопределенным является и модуль упругости (модуль Юнга). Это вопросы, на которые также необходимо получить ответы в будущих исследованиях лунного грунта.

Автор глубоко признателен за помощь, конструктивную критику и замечания академику М.Я. Марову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ацагорян З.А., Акоюн Г.Г., Саркисов Р.Р., Черкасов И.И., Шварев В.В. К созданию аналога лунного грунта // Современные представления о Луне. М.: Наука, 1972. С. 113–116.
- Бондаренко Н.В., Шкуратов Ю.Г. Карта толщины реголитового слоя видимого полушария Луны по радиолокационным и оптическим данным // Астрон. вестн. 1998. Т. 32. № 4. С. 301–309. (Bondarenko N.V., Shkuratov Yu.G. A map of regolith-layer thickness for the visible lunar hemisphere from radar and optical data // Sol. Syst. Res. 1998. V. 32. № 4. P. 264–272.).
- Громов В.В., Леонович А.К., Шварев В.В., Ложкин В.А., Пенетригов В.Н., Семенов П.С., Рыбаков А.В., Наумов П.Н., Грушевский В.П., Губарева В.М. Результаты исследований физико-механических свойств образца лунного грунта в среде азота // Грунт из материкового района Луны. М.: Наука, 1979. С. 686–690.
- Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Обнаружение потока тепла из недр Луны // Астрон. журн. 1963. Т. 40. № 6. С. 1076–1082.
- Леонович А.К., Громов В.В., Рыбаков А.В., Петров В.К., Павлов П.С., Черкасов И.И. Исследования механических свойств лунного грунта на самоходном аппарате “Луноход-1” // Передвижная лаборатория на Луне “Луноход-1” / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1971. С. 78–88.
- Леонович А.К., Громов В.В., Дмитриев А.Д., Ложкин В.А., Павлов П.С., Рыбаков А.В. Результаты исследований физико-механических свойств образца лунного грунта в исследовательском боксе в среде азота // Лунный грунт из Моря Изобилия / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1974. С. 563–570.
- Леонович А.К., Громов В.В., Дмитриев А.Д., Ложкин В.А., Пенетригов В.Н., Семенов П.С., Шварев В.В. Основные особенности процессов деформации и разрушения лунного грунта // Космохимия Луны и планет / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1975. С. 585–592.
- Лу Я., Шевченко В.В. Повышенное содержание железа в склоновых осыпях некоторых лунных кратеров // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 4. С. 271–281. (Lu Y., Shevchenko V.V. Increased iron abundances in slope avalanches of certain lunar craters // Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 4. P. 253–262.).
- Родэ О.Д., Иванов А.В., Назаров М.А., Цимбалников А., Юрек К., Гейл В. Атлас микрофотографий поверхности частиц лунного реголита. Прага: Академия, 1979. 158 с.
- Стахеев Ю.И. Закономерности распределения частиц лунного грунта // Грунт из материкового района Луны. М.: Наука, 1979. С. 78–82.
- Стахеев Ю.И., Лаврухина А.К. Гранулометрические характеристики лунного реголита и мощность слоя реголита на местах посадок АС “Луна-16 и -20” // Грунт из материкового района Луны. М.: Наука, 1979. С. 74–76.
- Тихонова Т.В., Троицкий В.С. Влияние потока тепла из недр Луны на ее радиоизлучение при изменении свойства вещества в глубину // Астрон. журн. 1969. Т. 46. № 1. С. 159–171.
- Троицкий В.С., Тихонова Т.В. Результаты исследования поверхностного слоя Луны по ее собственному излучению // Современные представления о Луне. М.: Наука, 1972. С. 46–62.
- Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. Грунтоведение / Ред. Трофимов В.Т. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
- Фехтнг Г., Гейтнер В., Хартунг Дж.Б., Нагель К., Нойкум Г., Шнейдер Е., Шторцер Д. Микроратеры на лунных образцах // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 453–472.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Иванов А.В. Роль экзогенных факторов в формировании лунной по-

- верхности // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 439–452.
- Херц Ф., Моррисон Д.А., Голт Д.Е., Обербек В.Р., Квайд В.Л., Веддер Дж.Ф., Броунли Д.Е., Хартунг Дж.Б., Шнайдер Е. Микрометеоритный комплекс и эволюция лунного реголита // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 473–500.
- Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.
- Черкасов И.И., Шварев В.В. Грунты Луны. М.: Наука, 1975. 144 с.
- Шевченко В.В., Пуне П.К., Шеврель С.Д., Даду И., Лу Я., Скобелева Т.П., Кварацхелия О.И., Роземберг К. Современные склоновые процессы на Луне // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 1. С. 3–20. (Shevchenko V.V., Pine P.K., Shevrel S.D., Dadu I., Lu Y., Skobeleva T.P., Kvaratskhelia O., Rosemberg K. Modern slope processes on the Moon // Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 1. P. 1–17.)
- Шкуратов Ю.Г. Луна далекая и близкая. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2006. 184 с.
- Allton J.H., Waltz S.R. Depth scales for Apollo 15, 16, and 17 drill cores // Proc. 11th Lunar and Planet. Sci. Conf., 1980. P. 1463–1477.
- Batiste S.N., Sture S. Lunar Regolith simulant MLS-1: production and engineering properties // Lunar regolith simulant materials workshop, Marshal Inst. 2005. С. 12–13.
- Battler M.M., Spray J.G. The Shawmere anorthosite and OB-1 as lunar highland regolith simulants // Planet. and Space Sci. 2009. V. 57. P. 2128–2131.
- Butler J.C., King E.A. Analysis of grain size-frequency distributions of lunar fines // Proc. 5th Lunar Sci. Conf., 1974. P. 829–841.
- Carpenter P., Sibille L., Wilson S., Meeker G. Development of standardized lunar regolith simulant materials // Microscopy and Microanalysis. 2006. V. 12. Suppl. 02. P. 886–887.
- Cadenhead D.A., Jones B.R. The adsorption of atomic hydrogen on 15101,168 // The Apollo 15 Lunar Samples / Eds. Chamberlain J.W., Watkins C. Houston: The Lunar Science Institute, 1972. P. 272–274.
- Cadenhead D.A., Wagner N.J., Jones B.R., Stetter J.R. Some surface characteristics and gas interactions of Apollo 14 fines and fragments // Proc. 3rd Lunar Sci. Conf. 1972. P. 2243–2257.
- Cadenhead D.A., Stetter J.R., Buergel W.G. Pore structure in lunar samples // J. Colloid Interface Sci. 1974. V. 47. P. 322–336.
- Cadenhead D.A., Stetter J.R. Specific gravities of lunar materials using helium pycnometry // Proc. 6th Lunar Sci. Conf. 1975. P. 3199–3206.
- Carrier W.D. III. Lunar soil mechanics on the Apollo missions // Texas Civil Engineering. 1970. Abstract # 40. P. 7.
- Carrier W.D. III., Bromwell L.G., Martin R.T. Strength and compressibility of returned lunar soil // Proc. 3rd Lunar Sci. Conf. 1972. P. 3223–3234.
- Carrier W.D. Lunar soil grain size distribution // The Moon. 1973. V. 6. P. 250–263.
- Carrier W.D. III., Mitchell J.K., Mahmood A. The nature of lunar soil // J. Soil Mech. Found. Div., Am. Soc. Civ. Eng. 1973a. V. 99. P. 813–832.
- Carrier W.D. III., Mitchell J.K., Mahmood A. The relative density of lunar soil // Proc. 4th Lunar Sci. Conf. 1973b. P. 2403–2411.
- Carrier W.D. III. Apollo drill core relationships // The Moon. 1974. V. 10. P. 183–194.
- Carrier W.D. III. Geotechnical implications for a lunar base (abstract) // Papers Presented to the 1984 Symp. on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, NASA, Washington, D.C. 1984. P. 75–76.
- Carrier W.D. III, Olhoeft G.R., Mendell W. Physical properties of the lunar surface // Lunar Sourcebook / Eds. Heiken G., Vaniman D., French B.M. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 475–594.
- Choate R., Batterson S.A., Christensen E.M., Hutton R.E., Jaffe L.D., Jones R.H., Ko H.Y., Scott R.F., Spencer R.L., Sperling F.B., Sutton G.H. Lunar surface mechanical properties // Surveyor Program Results. NASA SP-18. NASA, Washington, D.C. 1969. P. 129–171.
- Costes N.C., Carrier W.D. III, Mitchell J.K., Scott R.F. Apollo 11 soil mechanics investigation // Apollo 11 Preliminary Science Report, NASA SP-214. 1969. P. 85–122.
- Costes N.C., Carrier W.D. III, Mitchell J.K., Scott R.F. Apollo 11: Soil mechanics results // J. Soil Mech. Found. Div., Am. Soc. Civ. Eng. 1970. V. 96. P. 2045–2080.
- Costes N.C., Cohron G.T., Moss D.C. Cone penetration resistance test – an approach to evaluating the in-place strength and packing characteristics of lunar soils // Proc. 2nd Lunar Sci. Conf. 1971. P. 1973–1987.
- Desai C.S. Saadatmanesh H., Girdner K. Development and mechanical properties of structural materials from lunar simulants // Resources of Near-Earth Space / Eds. Lewis J.S., Matthews M.S., Guerrieri M.L. Univ. Arizona Press, 1993. P. 297–324.
- Duennebieer F., Sutton G. Thermal moonquakes // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 4351–4363.
- Duke M.B., Woo C.C., Bird M.L., Sellers G.A., Finkelman R.B. Lunar soil: size distribution and mineralogical constituents // Science. 1970. V. 167. P. 648–650.
- Durgunoglu H.T., Mitchell J.K. Static penetration resistance of soils: I – Analysis // Proc. Specialty Conf. on in situ Measurement of Soil Properties, Amer. Soc. of Civil Engineers, Raleigh. 1975. P. 151–171.
- French B.M. The Moon Book. Harmondsworth, Middlesex, England: Penguin Books, 1977. 287 p.
- Engelhardt W.V., Hurrle H., Luft E. Microimpact-induced changes of textural parameters and modal composition of the lunar regolith // Proc. 7th Lunar Sci. Conf. 1976. V. 1. P. 373–392.
- Gault D.E., Horz F., Hartung J.B. Abrasion and catastrophic rupture of lunar rocks: some implications for the micrometeoroid flux at 1 AU // COSPAR Space Res. 13th Proc. Open. Meet. Working groups, Phys. Sci. 15th Planet. Meet. COSPAR, Madrid, 1972. Berlin, 1973. V. 2. P. 1085–1093.
- He X.X., Xiao L., Huang J., Wan C.H., Wu T., Gao R., Yan S.W., He Q. Lunar regolith simulant CUG-1A // 41st Lunar and Planet. Sci. Conf. 2010. Abstract # 1183.
- Heiken G., Duke M., McKay D.S., Clanton U.S., Fryxell R., Nagle J.S., Scott R., Sellers G.A. Preliminary stratigraphy of the Apollo 15 drill core // Proc. 4th Lunar Sci. Conf. 1973. V. 1. P. 191–213.
- Heiken G.H., Morris R.V., McKay D.S., Fruland R.M. Petrographic and ferromagnetic resonance studies of the Apollo 15 deep drill core // Proc. 7th Lunar Sci. Conf. 1976. V. 1. P. 93–111.
- Heywood H. Particle size and shape distribution for lunar fines sample 12057.72 // Proc. 2nd Lunar Sci. Conf. 1971. P. 1989–2001.
- Horai K., Winkler J.L. Thermal diffusivity of four Apollo 17 rock samples // Proc. 7th Lunar Sci. Conf. 1976. P. 3183–3204.
- Horai K., Winkler J.L. Thermal diffusivity of two Apollo 11 samples, 10020.44 and 10065.23: effect of petrofabrics

- on the thermal conductivity of porous lunar rocks under vacuum // Proc. 11th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1980. P. 1777–1788.
- Houston W.N., Mitchell J.K., Carrier W.D. III. Lunar soil density and porosity // Proc. 5th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1974. P. 2361–2364.
- Jaffe L.D., Alley C.O., Batterson S.A., Christensen E.M., Dwornik S.E., Gault D.E., Lucas J.W., Muhleman D.O., Norton R.H., Scott R.F., Shoemaker E.M., Steinbacher R.H., Sutton G.H., Turkevich A.L. Principal scientific results from the Surveyor program // Icarus. 1970. V. 12. P. 156–160.
- Jaffe L.D. Shear strength of lunar soil from Oceanus Procellarum // The Moon. 1973. V. 8. P. 58–72.
- Jiang M., Li L., Wang C., Zhang H. A new lunar soil simulant in China // Earth and Space Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. 2010. P. 3617–3623.
- Jiang M., Shen Z., Li L., Su J. A novel specimen preparation method for TJ-1 lunar soil simulant in hollow cylinder apparatus // J. Rock Mechanics and Geotechnical Eng. 2012. V. 4, № 4. P. 312–325.
- Kanamori H., Satoru U., Tetsuji Y., Shinji M., Kenji T. Properties of lunar soil simulant manufactured in Japan // 6th Proc. Int. Symp. on Space. Reston. USA. 1998a. P. 462–468.
- Kanamori H., Udagawa S., Yoshida T., Matsumoto S., Takagi K. Properties of Lunar Soil Simulant Manufactured in Japan // Space 98. 1998b. P. 462–468.
- King E.A., Jr., Butler J.C., Carman M.F. Chondrules in Apollo 14 samples and size analyses of Apollo 14 and 15 fines // Proc. 3rd Lunar Sci. Conf. 1972. V. 1. P. 673–686.
- King E.A., Jr., Butler J.C. Rosin's law and the lunar regolith // The Moon. 1977. V. 17. P. 177–178.
- Li Y., Liu J., Yue Z. NAO-1: Lunar highland soil simulant developed in China // J. Aerosp. Eng. 2009. V. 22. P. 53–57.
- Mahmood A., Mitchell J.K., Carrier W.D. III Grain orientation in lunar soil // Proc. 5th Lunar Sci. Conf. 1974. P. 2347–2354.
- McKay D.S., Fruland R.M., Heiken G.H. Grain size and the evolution of lunar soils // Proc. 5th Lunar Sci. Conf. 1974. V. 1. P. 887–906.
- McKay D.S., Dungan M.A., Morris R.V., Fruland R.M. Grain size, petrographic, and FMR studies of the double core 60009/10: a study of soil evolution // Proc. 8th Lunar Sci. Conf. 1977. P. 2929–2952.
- McKay D.S., Basu A., Waits G. Grain size and the evolution of Luna 24 soils // Mare Crisium: The View from Luna 24 / Eds. Merrill R.B., Papike J.J. New York: Pergamon, 1978. P. 125–136.
- McKay D.S., Carter J.L., Boles W.W., Allen C.C., Allton J.H. JSC-1: A new lunar soil stimulant // Engineering, Construction, and Operations in Space / 24th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1993. P. 963–964.
- McKay D.S., Carter J.L., Boles W.W., Allen C.C., Allton J.H. JSC-1: A new lunar soil stimulant // Engineering, Construction, and Operations in Space / Proc. 4th Int. Conf. on Space. New York: American Society of Civil Engineers, 1994. P. 857–866.
- Melosh H.J. Impact cratering: a geologic process. Oxford: Oxford Univ. Press, 1989. 245 p.
- Mitchell J.K., Bromwell L.G., Carrier W.D. III, Costes N.C., Scott R.F. Soil mechanics experiment // Apollo 14 Preliminary Science Report. NASA SP-272. 1971. P. 87–108.
- Mitchell J.K., Houston W.N., Scott R.F., Costes N.C., Carrier W.D. III, Bromwell L.G. Mechanical properties of lunar soil: density, porosity, cohesion, and angle of friction // Proc. 3rd Lunar Sci. Conf. 1972a. P. 3235–3253.
- Mitchell J.K., Bromwell L.G., Carrier W.D. III, Costes N.C., Houston W.N., Scott R.F. Soil-mechanics experiments // Apollo 15 Preliminary Science Report. NASA SP-289. 1972b. P. 7-1–7-28.
- Mitchell J.K., Carrier W.D. III, Houston W.N., Scott R.F., Bromwell L.G., Durgunoglu H.T., Hovland H.J., Treadwell D.D., Costes N.C. Soil mechanics // Apollo 16 Preliminary Science Report. NASA SP-315. 1972c. P. 8-1–8-29.
- Mitchell J.K., Carrier W.D. III, Costes N.C., Houston W.N., Scott R.F., Hovland H.J. Soil mechanics // Apollo 17 Preliminary Science Report. NASA SP-330. 1973. P. 8-1–8-22.
- Mitchell J.K., Houston W.N., Carrier W.D. III, Costes N.C. Apollo Soil Mechanics Experiment S-200 // Final report, NASA Contract NAS 9-11266, Univ. of California, Berkeley. 1974. Space Sciences Laboratory Series 15, Issue 7. 135 p.
- Mitchell J.K., Houston W.N. Static penetration testing on the Moon // European 1st Symp. in Penetration Testing, Intl. Soc. for Soil Mech. and Found. Eng. 1974. P. 277–284.
- Mitchell J.K. Fundamentals of Soil Behavior. New York: Wiley, 1976. 422 p.
- Morris R.V., Score R., Dardano C., Heiken G. Handbook of Lunar Soils // JSC Publ. № 19069, Planetary Materials Branch Publ. № 67. NASA Johnson Space Center, Houston. 1983. 914 p.
- Oravec H.A., Zeng X., Asnani V.M. Design and characterization of GRC-1: a soil for lunar terramechanics testing in Earth-ambient conditions // J. Terramechanics. 2010. V. 47. Iss. 6. P. 361–377.
- Scott R.F., Roberson F.I. Soil mechanics surface sampler // Surveyor Program Results. NASA SP-184. 1969. P. 171–179.
- Scott R.F., Zuckerman K.A. Examination of returned Surveyor III surface sampler // Proc. Lunar Sci. Conf. 1971. V. 2. P. 2743–2751.
- Shevchenko V.V., Pinet P.C., Chevrel S., Daydou Y., Yangxiaoyi L., Skobeleva T.P., Kvaratskhelia O.I., Rosenberg C. The current avalanche deposits in lunar crater Reiner. LRO data // 38th Lunar Planet. Sci. Conf. 2011. P. 1161.
- Stoeser D., Wilson S., Rickman D.L. Design and specifications for the highland regolith prototype simulants NU-LHT-1M and -2M // NASA/TM-2010-216438. MSFC, Alabama. 2010a. 24 p.
- Stoeser D.B., Wilson S., Rickman D.L. Preliminary geological findings on the BP-1 simulant // NASA/TM-2010-216444. MSFC, Alabama. 2010b. 34 p.
- Taylor L.A., Liu Y. Important considerations for lunar soil simulants // Earth and Space Sci. Engr., Sci., Constr., Oper. 2010. P. 106–118.
- Weiblen P.W., Murawa M.J., Reid K.J. Preparation of simulants for lunar surface materials // Space II, American Society of Civil Engineers. New York, 1990. P. 428–435.
- Zeng X.M., He C., Wilkinson A.M. Geotechnical properties of NT-LHT-2M lunar highland stimulant // J. Aerosp. Eng. 2010. V. 23. P. 213–218.