

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ЛУННЫХ ГРУНТОВ

MODELING OF THE GRAIN-SIZE COMPOSITION OF LUNAR SOILS

КОРОЛЕВ В.А.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., korolev@geol.msu.ru

KOROLEV V.A.

Professor of the Engineering and Ecological Department of the Geological Faculty of the Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), korolev@geol.msu.ru

Ключевые слова:

лунный грунт; реголит; грунт-аналог; гранулометрический состав; моделирование.

Keywords:

lunar soil; regolith; soil-analogue; grain-size composition; modeling.

Аннотация

Рассмотрены вопросы моделирования гранулометрического состава поверхностных отложений Луны (лунных реголитов) с целью создания в земных условиях их аналогов.

Обосновано применение земных природных грунтов и искусственных материалов в качестве исходных компонентов. Результаты инженерно-геологических исследований по созданию в земных условиях аналогов лунных реголитов могут использоваться для отработки конструкций посадочных аппаратов, лунных модулей и строительства на Луне долговременных станций.

Abstract

The paper considers problems of modeling of the grain-size composition of moon surface deposits (lunar regoliths) in order to create their analogues in the earth conditions. Application of earth natural soils and artificial materials as source components is substantiated. Results of engineering-geological surveys for creation of analogues of lunar regoliths in the earth conditions can be used to develop constructions of landers, lunar modules and to construct long-term stations on the Moon.

Введение

Инженерно-геологическое исследование грунтов Луны активно осуществлялось в 1960–1970-е годы благодаря советской программе автоматизированных луноходов и американской программе «Аполлон», завершившейся в 1969 году высадкой на Луну первых космонавтов. Можно уверенно сказать, что с этого времени начались и инженерно-геологические изыскания на Луне. Затем интерес к изучению Луны снизился на десятилетия по ряду причин. Однако в последнее время в России, США, Китае и в других странах вновь стали развиваться исследования поверхностных отложений Луны, Марса и прочих космических тел земной группы [1–11, 13–15]. В частности, в настоящее время разрабатываются новые программы изучения Луны в связи с планируемым возобновлением пилотируемых полетов на нее, строительством лунных станций, а также с использованием Луны в будущей энергетике и отработке иных высоких технологий.

В этой связи большое значение приобретают инженерно-геологические исследования по созданию в земных условиях грунтов — аналогов лунных поверхностных отложений (реголитов), которые могли бы использоваться для отработки конструкций посадочных аппаратов, лунных модулей и строительства на Луне долговременных станций. К настоящему времени в России и ряде зарубежных стран, прежде всего в США и Китае, накоплен определенный опыт создания искусственных грунтов-аналогов [11, 13–15]. Однако многие вопросы моделирования лунного реголита остаются еще невыясненными. К тому же реголиты в разных районах Луны обладают определенными различиями по гранулометрическому составу, физическим и физико-механическим свойствам, которые наиболее важны при создании их инженерно-геологических моделей.

На поверхности Земли можно найти дисперсные грунты, которые по своему составу и свойствам весьма близки к лунным реголитам. В частности, к ним относятся пепловые пески некоторых районов Камчатки, пирокластические отложения ряда территорий Китая

и США. На натуральных полигонах, сложенных именно такими грунтами, обрабатывались конструкции луноходов и посадочных аппаратов в 1960-е годы в СССР и США [11].

Однако при этом серьезной проблемой является то, что устройство испытательного полигона на Камчатке весьма дорого. Кроме того, затратна и доставка с Камчатки в исследовательские организации Москвы или других городов центральной части России больших объемов пепловых отложений для испытаний посадочных аппаратов на стендовых моделях большой площади (например, размером более 10×20 м). Поэтому для таких целей необходим подбор более дешевых и доступных исходных грунтов, а также искусственных материалов.

Исходя из этого целью настоящей работы является обоснование методики моделирования гранулометрического состава грунтов — аналогов лунных реголитов для создания инженерно-геологических моделей лунных грунтов.

Задачами исследования являлись: обоснование рациональной методики моделирования гранулометрического состава грунтов-аналогов; подбор исходных земных грунтов-аналогов и искусственных материалов для создания инженерно-геологической модели реголита.

Исследования выполнялись на кафедре инженерной и экологической геологии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в рамках сотрудничества с Научно-производственным объединением им. С.А. Лавочкина по проекту «Луна-Ресурс»¹.

Методика моделирования гранулометрического состава грунтов-аналогов

Основой для моделирования послужили данные по гранулометрическому составу лунного реголита из различных районов Луны, собранные из литературных источников в единую базу данных.

На начальном этапе работ производился расчет требуемого гранулометрического состава будущей модели. Для этого на основе анализа созданной базы данных строились интегральные кривые «усредненного» гранулометрического состава лунного реголита определенной крупности, например пылеватого, песчаного или гравелистого.

Несмотря на различия в дисперсности пылеватых, песчаных и гравелистых грунтов для различных районов Луны (областей «морей», кратеров, валов, гор и т.д.), для определенной разности (например, пылеватой) интегральные кривые их гранулометрического состава укладываются в относительно узкий диапазон, для которого может быть построена «усредняющая» кривая, представляющая собой модель, отражающую «средний», или наиболее вероятный, гранулометрический состав реголита данной разности (рис. 1).

На следующем этапе проводился подбор гранулометрического состава данной модели (смеси) на основе земных грунтов-аналогов и искусственных материала-

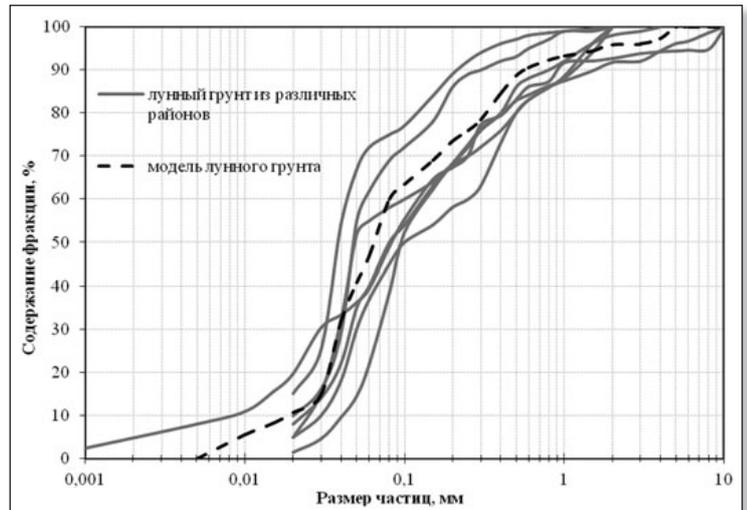


Рис. 1. Пример «усредненной» интегральной кривой гранулометрического состава для модели пылеватого лунного грунта [3]

лов. Для этого использовался метод предельных кривых [12]. Его суть состоит в том, что из двух исходных грунтов с известными интегральными кривыми гранулометрического состава можно составить смесь, интегральная кривая которой будет заключена между этими двумя предельными линиями.

Вычисление пропорции для смеси двух грунтов (кривые 1 и 2) поясняется на рис. 2. При смешивании их в отношении (1:m) ордината кривой C для некоторой фракции смеси из (1+m) частей:

$$C = (C_1 + mC_2)/(1+m), \tag{1}$$

где C₁, C₂ — ординаты интегральных кривых гранулометрического состава смешиваемых грунтов 1 и 2 соответственно.

Требуемое соотношение между долями двух смешиваемых грунтов, необходимое для получения смеси с заданным содержанием C какой-либо фракции:

$$m = (C - C_1)/(C_2 - C). \tag{2}$$

Аналогичные расчеты проводились и для других фракций.



Рис. 2. Графики гранулометрического состава для подбора смеси из двух грунтов [12] (1, 2 — интегральные кривые гранулометрического состава исходных грунтов 1 и 2; C_D — содержание фракций, массовая доля; C₁, C₂, C — содержание фракций в грунте 1, грунте 2 и в их смеси соответственно; D — диаметр частиц)

¹ В лабораторных экспериментах принимали участие магистрант Е.В. Гладкова, аспирант А.А. Кугубаев, студент В.А. Медведев с кафедры инженерной и экологической геологии МГУ.

Если смесь составляется из трех грунтов, то сначала проводят подбор промежуточной смеси для двух из них, а затем подбор для промежуточной смеси с третьим грунтом [12].

Гранулометрический состав исходных грунтов и материалов определялся в ходе работ стандартным ситовым методом по ГОСТ 12536-2014.

Подбор исходных грунтов и материалов

Пригодность потенциальных исходных грунтов и материалов определялась несколькими факторами:

- близостью их гранулометрического состава к лунному реголиту;
- морфологическим подобием частиц их фракций и реголита, в частности наличием сферолитов в пылеватой фракции, отсутствием окатанных частиц в песчаной фракции, наличием брекчиевидных обломков в дресвяной и более крупных фракциях и др.;
- близостью их минерального состава к лунному реголиту [2, 3, 6].

Важным условием при этом являлась также возможность закупки предложенных грунтов и материалов в большом объеме для изготовления стендовых моделей на предприятиях, занимающихся разработкой лунных посадочных аппаратов. При этом исходные материалы должны быть дешевыми и доступными для создания крупногабаритных стендов испытаний площадью, например, свыше 10×10 м. Преимущество отдавалось поставщикам, находящимся в одном городе (или области) с институтами-разработчиками.

В качестве ингредиентов смеси грунтов-аналогов могут быть использованы как искусственные материалы, так и природные грунты, моделирующие лунные

по гранулометрическому составу, такие как: вулканогенные андезит-базальтовые пески; щебень и дресва земных магматических пород (андезитов, туфов и пр.); техногенные золы; металлургические шлаки; продукты дробления скальных пород андезитового состава.

Если из двух исходных грунтов не удается подобрать смесь требуемого гранулометрического состава, то необходимо применить последовательное введение дополнительных добавок или недостающих фракций из искусственно подготовленных материалов, например техногенных (шлака, золы) или природных (обломков андезитов) [6].

Гранулометрический состав грунтов-аналогов можно смоделировать полностью на основе одного исходного материала, например андезит-базальта, путем его измельчения и фракционирования. Затем, получив необходимые фракции в нужном количестве, можно составить из них грунт необходимого гранулометрического состава, смешав фракции в заданных пропорциях. Однако подобный метод создания грунта-аналога в большом объеме является весьма дорогостоящим.

Поэтому для выбора потенциальных исходных компонентов моделей был проанализирован большой перечень грунтов и строительных материалов, доступных в Москве, в Московской, Калужской, Свердловской и Тульской областях, в том числе поставляемых в больших объемах различными компаниями (табл. 1). Наряду с этим для исследований все же были привлечены скальные и дисперсные вулканогенные породы Камчатки — андезиты из Кошелевского вулканического массива и туфы из Паужетского геотермального района, а также пирокластические отложения (вулканический песок) Толбачинского дола и вулканический пепел вулкана Шивелуч (см. табл. 1). Несмотря

Таблица 1

Перечень исходных грунтов и материалов, использованных для изготовления инженерно-геологических моделей лунных реголитов				
Материал	№ по паспорту	Сокращенное наименование	Полное наименование (по ГОСТ 25100-2011)	Место отбора
Природные грунты	2	П-2	Песок крупный неоднородный	г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 8, скв. 3, глуб. 12,5 м
	12	П-12	Песок пылеватый однородный	Московская обл., Ленинский р-н, д. Апаринки, скв. 5, глуб. 25,0 м
	17	П-17	Песок крупный однородный	Карелия, оз. Вендюрское
	-	МОС	Песок среднезернистый	Московская обл.
	-	МОМ	Песок мелкозернистый	Московская обл.
	13	АК	Андезит (молотый)	Южная Камчатка, Кошелевский вулканический массив, глуб. 0,5–1,8 м
	14	ТК	Туф, туффит (молотый)	Южная Камчатка, Паужетский геотермальный р-н, глуб. до 2 м
	19	ПК	Песок средней крупности неоднородный (вулканический песок)	Камчатка, Толбачинский дол
Техногенные материалы	18	КК	Песок крупнозернистый однородный (кварцевая крошка фракций 0,5–1 мм)	Свердловская обл., г. Екатеринбург, Верх-Исетский район, пос. Гора Хрустальная
	15	ЗЧ	Песок пылеватый неоднородный (зола)	Тульская область, г. Суворов, Черепетская ГРЭС
	16а	ШТ	Крупнообломочный дресвяный грунт (шлак доменный)	г. Тула
	16б	ШК	Крупнообломочный дресвяный грунт (шлак доменный)	Московская обл., г. Кубинка

на то что вулканогенные грунты Камчатки являются хорошими аналогами лунного реголита по минеральному составу, необходимо иметь в виду сложность их транспортировки с Камчатки в больших объемах и зачастую необходимость их дробления, что существенно повышает стоимость научных исследований.

В состав грубообломочных моделей лунных грунтов вошли крупнозернистые пески (образцы П-2, П-17), кварцевая крошка (обр. КК), доменные шлаки (обр. ШТ, ШК), щебенистые обломки туфов (обр. ТК) и андезитов (обр. АК), а также пирокластический материал Толбачинского дола (обр. ПК) (рис. 3, 5, 6).

В лунном реголите присутствует значительная доля мелкообломочной (песчаной) фракции, в составе которой преобладают тонкие (0,05–0,10 мм) и мелкие (0,10–0,25 мм) частицы. Учитывая, что песчаные частицы лунного реголита в основном являются неокатанными, для моделирования грунтов-аналогов необходимо использовать природные пески таких гене-

тических типов, которые отличаются минимальной окатанностью частиц. Среди них могут быть пески элювиальные, делювиальные и отчасти флювиогляциальные. Исключать из использования в моделях следует пески морские, аллювиальные и другие, отличающиеся, как правило, наилучшей окатанностью частиц.

Для создания пылеватых моделей лунного реголита лучше всего подошел песок пылеватый однородный (обр. П-12), а также пылеватые фракции молотых андезитов (обр. АК) и туфов (обр. ТК) и техногенный грунт — зола Черепетской ГРЭС (обр. ЗЧ).

Следует особо отметить, что в качестве одного из основных исходных материалов для модели пылеватых лунных грунтов могут служить именно золы, образующиеся при сжигании каменных углей, в частности золы Черепетской (г. Суворов Тульской области) (обр. ЗЧ) и Каширской ГРЭС. Внешне зола представляет собой однородный тонкопылеватый порошок серого цвета, очень похожий на реголит.

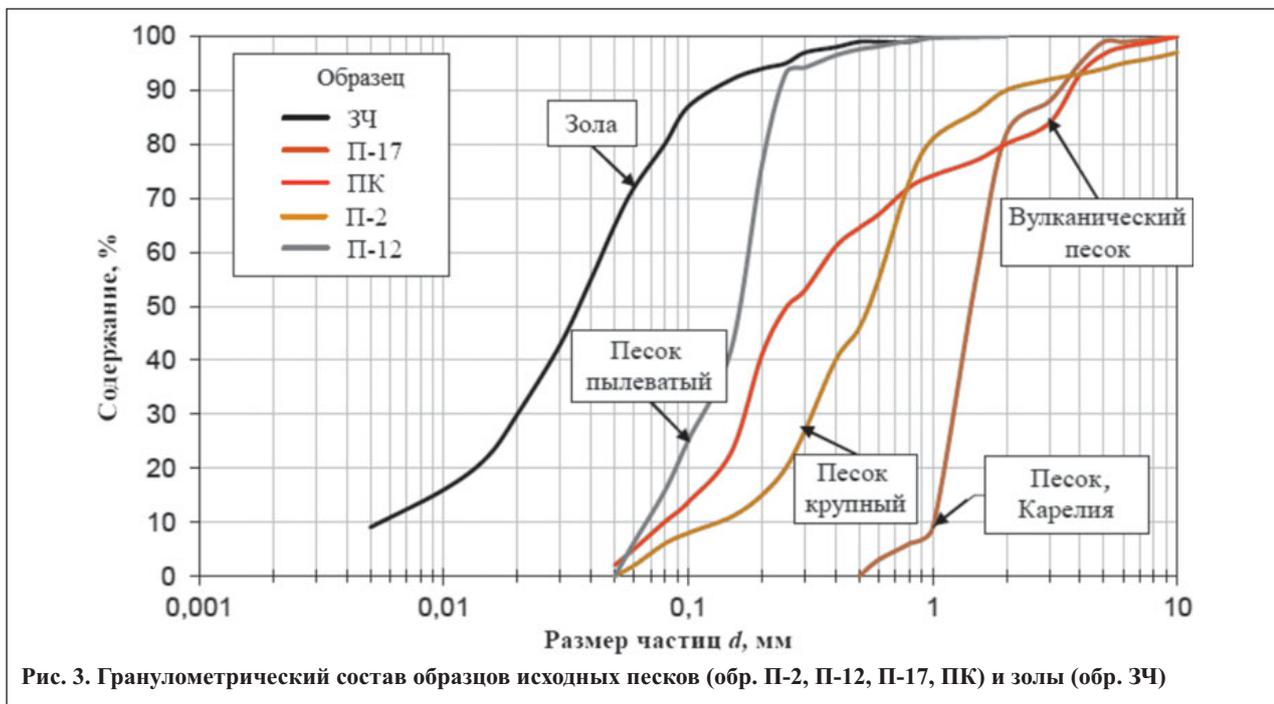


Рис. 3. Гранулометрический состав образцов исходных песков (обр. П-2, П-12, П-17, ПК) и золы (обр. ЗЧ)

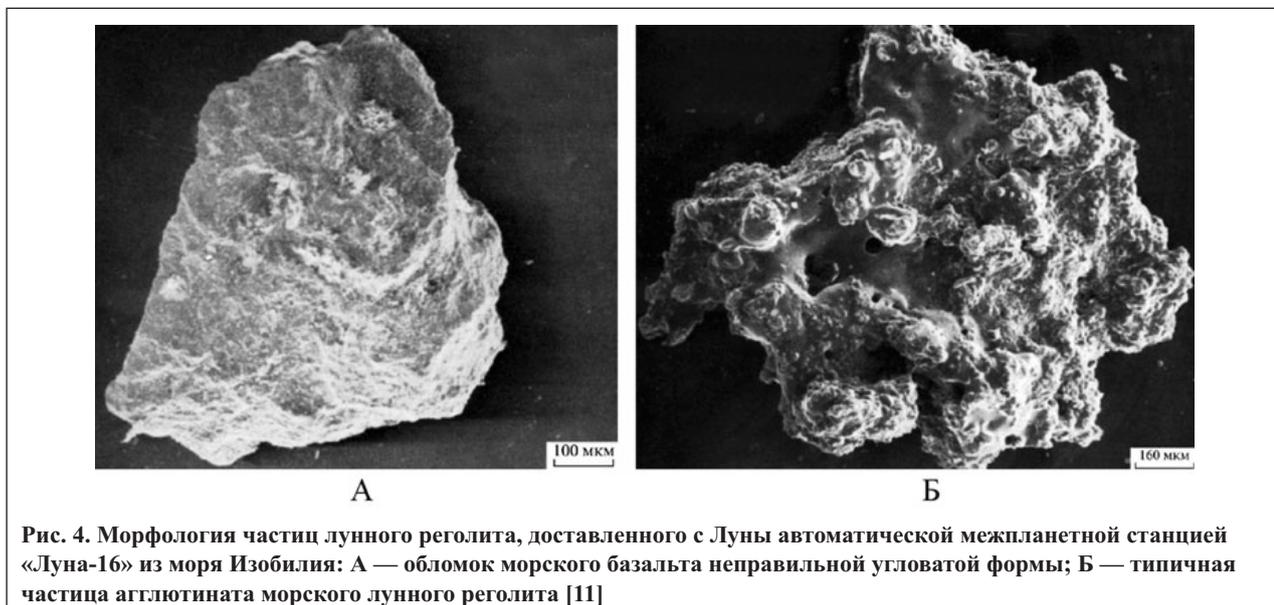


Рис. 4. Морфология частиц лунного реголита, доставленного с Луны автоматической межпланетной станцией «Луна-16» из моря Изобилия: А — обломок морского базальта неправильной угловатой формы; Б — типичная частица агглютината морского лунного реголита [11]



Рис. 5. Морфология частиц крупного песка (обр. П-17)

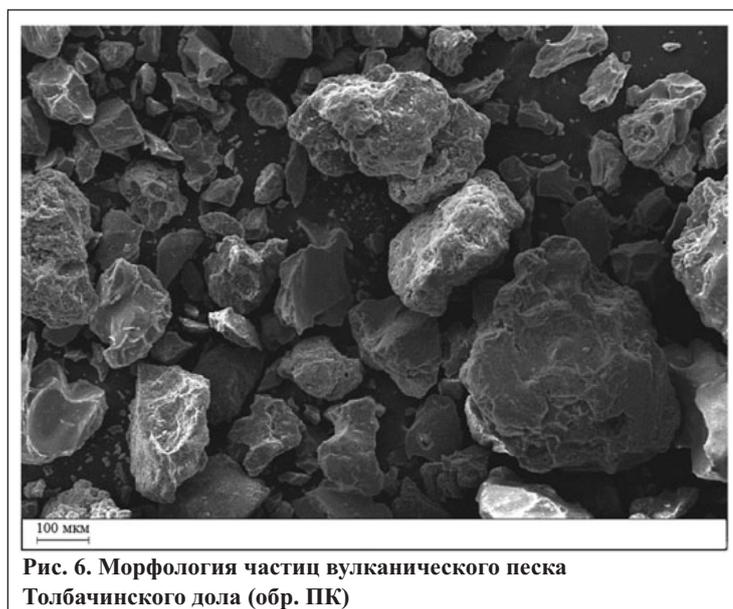


Рис. 6. Морфология частиц вулканического песка Толбачинского дола (обр. ПК)

Исследования автора показали, что зола Черепетской ГРЭС позволяет успешно моделировать не только специфическую дисперсность лунного реголита, но и морфологию его частиц, что будет рассмотрено ниже. Основную массу этой золы составляют шарообразные и округлые частицы различного размера, а также спекшиеся агрегаты разного размера и причудливой формы, напоминающие лунные частицы реголитовой брекчии (рис. 4, 7, 8). Кроме того, она схожа с реголитом по минеральному составу (состоит из силикатов), что также делает ее весьма ценным материалом для создания грунтов-аналогов.

Туфы Паужетского гидротермального района Южной Камчатки (обр. ТК) также являются вполне подходящим материалом для создания грунтов-аналогов в связи с их сходством с лунным реголитом по минеральному составу. Однако они требуют дробления, что ограничивает их применение для создания крупногабаритных стендовых моделей.

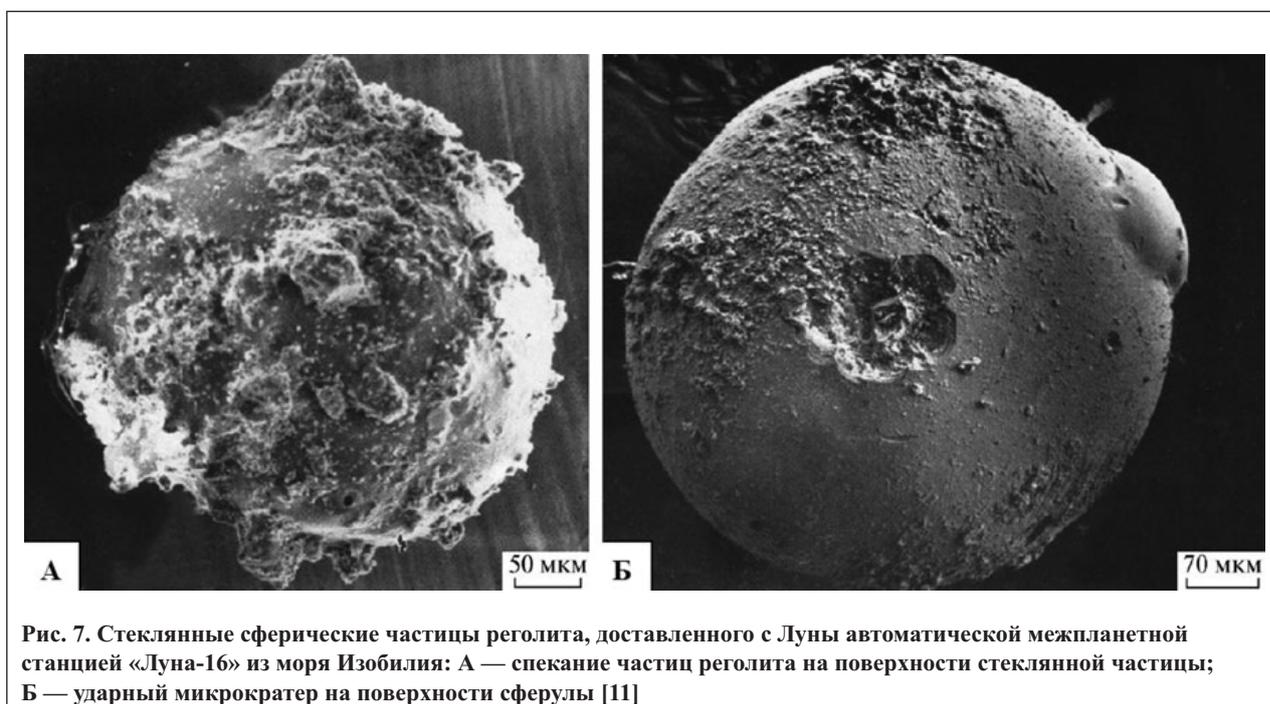


Рис. 7. Стекланные сферические частицы реголита, доставленного с Луны автоматической межпланетной станцией «Луна-16» из моря Изобилия: А — спекание частиц реголита на поверхности стеклянной частицы; Б — ударный микрократер на поверхности сферулы [11]



Рис. 8. Частицы золы различных форм и размеров: А — шарообразные сферулы; Б — остроугольные частицы

Таким образом, подобранные исходные природные грунты и искусственные материалы хорошо подошли для создания грунтов-аналогов и решения поставленных задач.

Результаты моделирования и их обсуждение

В соответствии с вышеописанной методикой изготовления смесей грунтов-аналогов требуемого гранулометрического состава были подобраны и изготовлены инженерно-геологические модели лунного грунта,

компонентный состав которых представлен в табл. 2, 3, а внешний вид — на рис. 9, 10.

Наиболее грубозернистым лунным реголитам соответствуют модели ЛГА-1 и ЛГА-2. Модель ЛГА-3 может использоваться как аналог «усредненного» для разных районов лунного реголита (она была реализована в виде крупногабаритной стендовой модели в Научно-производственном объединении им. С.А. Лавочкина как наиболее хорошо соответствующая вероятному лунному реголиту).

Наряду с вышеуказанными были созданы и другие модели грунтов-аналогов, которые более детально мо-

Таблица 2

Компонентный состав разработанных моделей грунтов-аналогов*													
Модель грунта-аналога	Исходные компоненты смесей												
	Природные грунты						Техногенные материалы						
	Песок крупный неоднородный (обр. П-2)	Песок крупный однородный (обр. П-17)	Песок среднезернистый (обр. МОС)	Песок мелкозернистый (обр. МОМ)	Песок пылеватый однородный (обр. П-12)	Андезиты (обр. АК)	Туфы (обр. ТК)	Вулканический песок (обр. ПК)	Кварцевая крошка (обр. КК)	Шлак (г. Тула) (обр. ШТ)	Шлак (г. Кубинка) (обр. ШК)	Зола Черепетской ГРЭС (обр. ЗЧ)	Зола Каширской ГРЭС (обр. ЗК)
ЛГА-1	-	-	83/5	-	-	-	-	-	-	17/1	-	-	-
ЛГА-2	-	-	-	67/2	-	-	-	-	-	-	-	33/1	-
ЛГА-3	-	-	-	-	-	-	-	-	33/2,5	-	27/2	-	40/3
ЛГА-5	-	-	-	-	25/2	15/1	-	-	-	-	-	60/4	-
ЛГА-6	-	-	-	-	-	-	100/1	-	-	-	-	-	-
ЛГА-7	36/4,5	26/3	-	-	-	30/3,5	-	-	8/1	-	-	-	-
ЛГА-8	-	-	-	-	-	-	100/1	-	-	-	-	-	-
ЛГА-9	-	-	-	-	-	-	-	100/1	-	-	-	-	-

* Над чертой — массовая доля (%), под чертой — весовые части (ед.).

Таблица 3

Содержание фракций туфов в моделях грунтов-аналогов ЛГА-6 и ЛГА-8										
Модель	Содержание фракций, %, с размером частиц, мм									
	<0,05	0,05÷0,10	0,10÷0,25	0,25÷0,50	0,5÷1,0	1÷2	2÷5	5÷10	>10	
ЛГА-6	67	10	15	5	2	1	0	0	0	
ЛГА-8	1	2	8	22	20	1	3	24	19	



Рис. 9. Общий вид мелкодисперсных грунтов-аналогов: А — ЛГА-5; Б — ЛГА-6

Таблица 4

Гранулометрический состав грунтов-аналогов											
Модель	Разновидность грунта по гранулометрич. составу по ГОСТ 25100-2011	Содержание фракций, %, с размером частиц, мм									Степень неоднородности, усл. ед.
		>10	10÷5	5÷2	2÷1	1,0÷0,5	0,50÷0,25	0,25÷0,10	0,10÷0,05	<0,05	
ЛГА-1	Гравелистый	5	5	28	6	6	23	22	3	2	11
ЛГА-2	Пылеватый	0	0	2	2	2	18	38	13	25	10
ЛГА-3	Среднезернистый	0	3	11	3	5	30	4	15	29	14
ЛГА-5	Мелкозернистый	0	0	4	3	4	12,5	12,5	23	41	4
ЛГА-6	Пылеватый	0	0	0	1	2	5	15	10	67	3
ЛГА-7	Гравелистый	0	21,5	5,5	26,5	8	13,5	13	9,5	2,5	18
ЛГА-8	Гравелистый	0	42	3	1	20	22	9	2	1	23
ЛГА-9	Средней крупности	0	3	17	5,5	9,5	15	36	14	0	7

делировали гранулометрический состав реголитов из различных регионов Луны. Модели ЛГА-6 и ЛГА-8 (см. рис. 8, 10, рис. 14, 16) состоят исключительно из молотых туфов (обр. ТК) с различным содержанием гранулометрических фракций (см. табл. 3). Модель ЛГА-9 (рис. 10, В) представляет собой пирокластический материал с вулкана Толбачик (обр. ПК), состоящий из вулканического песка с включениями оплавленных и спекшихся обломков шлаков из вулканического стекла и пепла (см. табл. 2).

Модели ЛГА-6, ЛГА-8 и ЛГА-9 моделируют не только гранулометрический, но и минеральный состав

лунных реголитов. Однако, если для стендовых испытаний минеральный состав грунтов-аналогов не имеет существенного значения, то можно использовать другие из вышеуказанных моделей, поскольку физико-механические характеристики (прежде всего прочность) их компонентов также близки к таковым у лунных реголитов. При этом стоимость и доступность исходных грунтов и материалов для этих моделей вполне позволяет изготавливать крупногабаритные стенды большой площади и значительного объема.

Всего было изготовлено восемь моделей грунтов-аналогов, которые можно использовать для создания



Рис. 10. Общий вид грубодисперсных грунтов-аналогов: А — ЛГА-7; Б — ЛГА-8; В — ЛГА-9

крупногабаритных стендовых моделей лунных грунтов. Гранулометрический состав разработанных моделей грунтов-аналогов представлен в табл. 4 и на рис. 11.

Как указывалось выше, одного совпадения гранулометрического состава лунного реголита и модели недостаточно для обеспечения их аналогии. Необходимо также обоснование аналогии по форме частиц грунта. С этой целью автором исследовались морфологические особенности частиц используемых исходных материалов, которые сравнивались с аналогичными особенностями лунного реголита. По результатам обработки РЭМ-фотографий² образцов исходных материалов, а также изготовленных на их основе грунтов-аналогов были рассчитаны основные количественные показатели размера, формы и характера поверхности частиц (табл. 5).

Анализ РЭМ-фотографий частиц моделей ЛГА-5 и ЛГА-6 позволяет сделать вывод о визуальном подобии морфологии частиц грунта-аналога и лунного реголита (рис. 12, 13, 14). Грунт-аналог содержит большое количество как шарообразных частиц, так и частиц неправильной формы с нечеткими контурами. На поверхности крупных частиц наблюдаются микроглобулы (см. рис. 13).

Как известно, на поверхности частиц лунного реголита встречается большое количество микрократеров, которые образовались при ударах микрометеоритов или при соударении частиц. На рисунке 15, Б наблюдается углубление в пылеватой частице молотого туфа модели ЛГА-6, которое свидетельствует о наличии аналогичных структур на частицах модели, но иного механического происхождения. Модель ЛГА-6 по морфологии составляющих ее частиц является аналогом морского новообразованного реголита верхних слоев Луны, подвергающегося интенсивному физическому выветриванию с перемещением частиц по-

² Сделанных с помощью растровой электронной микроскопии. — *Ред.*

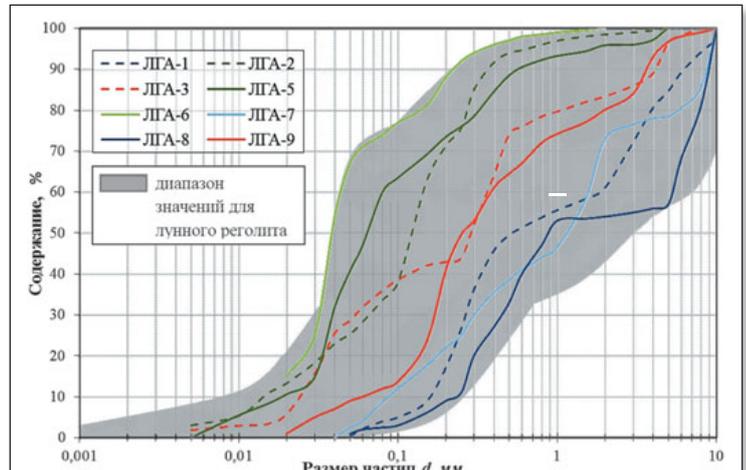


Рис. 11. Гранулометрический состав разработанных инженерно-геологических моделей лунного грунта

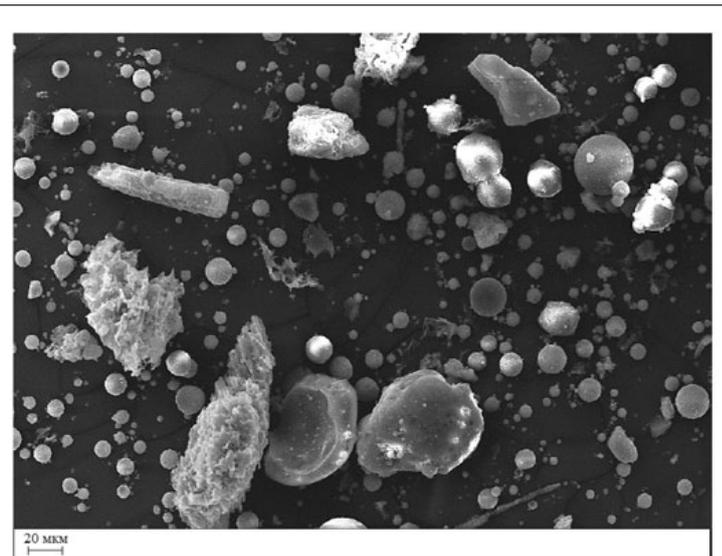


Рис. 12. Морфология частиц грунта мелкодисперсной модели ЛГА-5

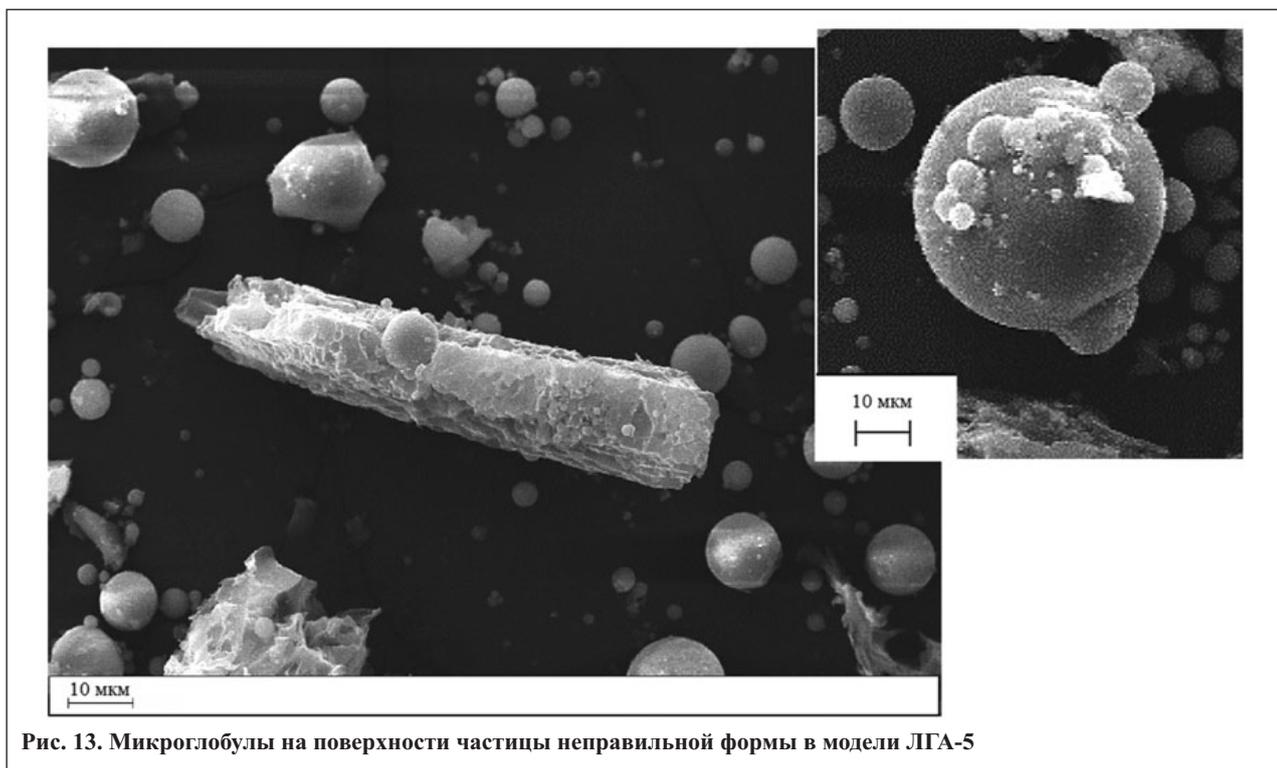


Рис. 13. Микроглобулы на поверхности частицы неправильной формы в модели ЛГА-5

Таблица 5

Результаты количественного морфологического анализа частиц грунта моделей и лунного реголита по РЭМ-фотоснимкам								
Показатель	Модель ЛГА-7			Модель ЛГА-8	Лунный реголит			
	обр. П-17	обр. АК	обр. КК	обр. ТК	горная долина Тавр-Литтров		горы Декарт	кратер Фра-Мауро
					участок 1	участок 2		
Средний диаметр частиц, мкм	1 538	375	871	445	149	218	2 881	56
Средняя площадь частиц, мкм ²	1 861 182	112 023	612 616	164 330	18 573	40 545	7 608 900	2 555
Средний периметр частиц, мкм	5 914	1 646	3 798	1 914	722	904	16 756	291
Коэффициент формы	0,72	0,7	0,69	0,76	0,73	0,75	0,68	0,64
Сферичность	0,84	0,81	0,81	0,84	0,83	0,85	0,77	0,76
Округлость	0,52	0,46	0,44	0,47	0,46	0,5	0,29	0,36
Окатанность	0,32	0,42	0,34	0,38	0,52	0,62	0,27	0,47

верхности, о чем свидетельствует разнообразие их форм и размеров.

Микростроение частиц крупнодисперсных грунтов моделей ЛГА-7 и ЛГА-8 характеризуется большим количеством остроугольных частиц и обломков неправильной формы (рис. 16). Такой тип морфологии частиц аналогичен таковой у лунного материкового реголита кратерных областей Луны, например кратера Фра-Мауро или кратера Тихо. Для моделей ЛГА-7 и ЛГА-8 был проведен количественный анализ основных параметров морфологии частиц в сравнении с лунными материковыми реголитами горных районов Тавр-Литтров (доставленным американским космическим кораблем «Аполлон-17») и Декарт («Аполлон-16»), а также кратера Фра-Мауро («Аполлон-12»).

На рисунке 14 представлены снимки микростроения лунных материковых реголитов из различных районов Луны, для которых также были произведены расчеты количественных показателей морфологии (см. табл. 5).

По результатам анализа РЭМ-изображений грунтов-аналогов и лунного реголита, а также их статистической компьютерной обработки можно сделать вывод о наличии аналогии между формами и размерами частиц реголита из различных районов Луны и изготовленных моделей разной дисперсности. Выявлено, что более высокодисперсные модели сходны по микростроению с хорошо переработанным зрелым лунным морским реголитом, а гравелистые и крупнозернистые модели аналогичны по своей морфологии реголиту горных районов и кратеров Луны.

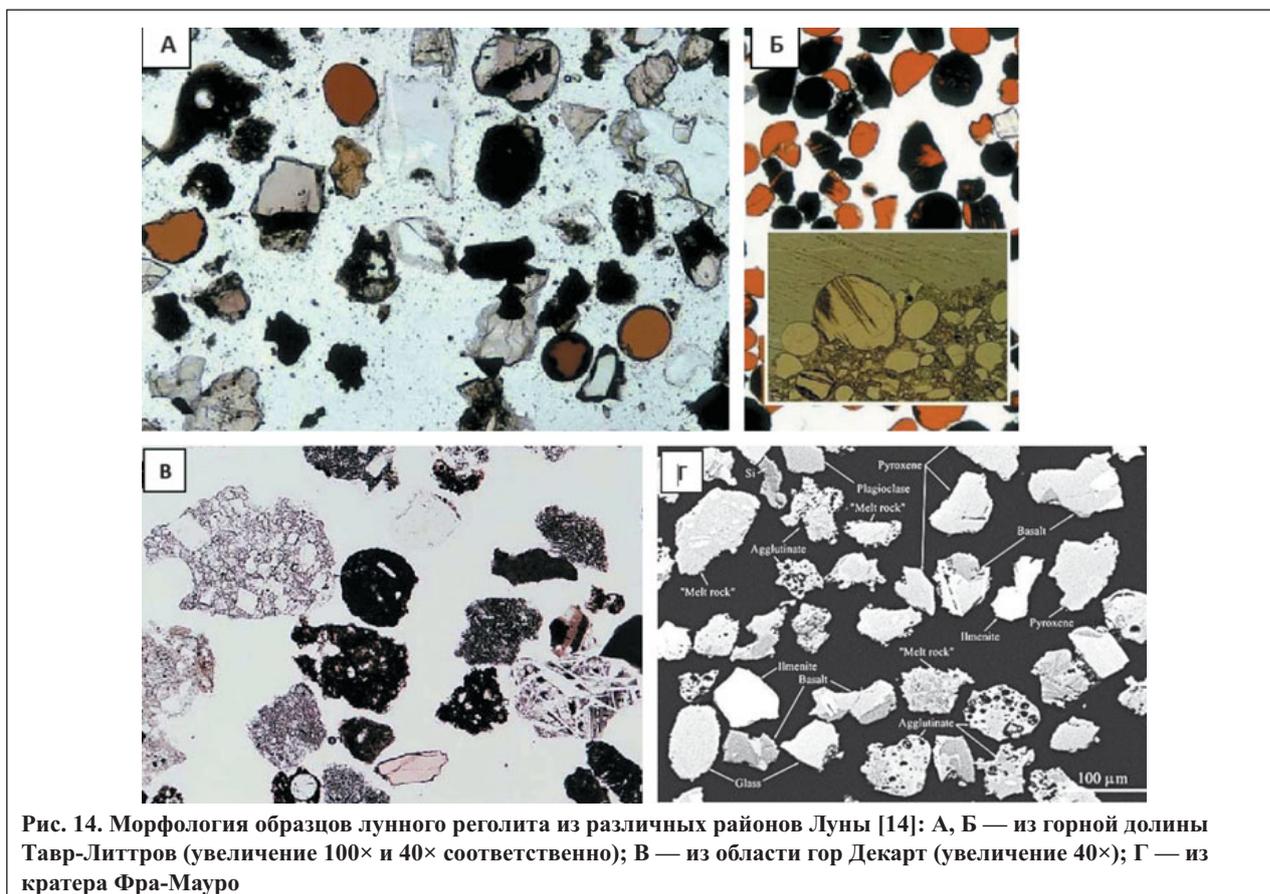


Рис. 14. Морфология образцов лунного реголита из различных районов Луны [14]: А, Б — из горной долины Тавр-Литтров (увеличение 100× и 40× соответственно); В — из области гор Декарт (увеличение 40×); Г — из кратера Фра-Мауро

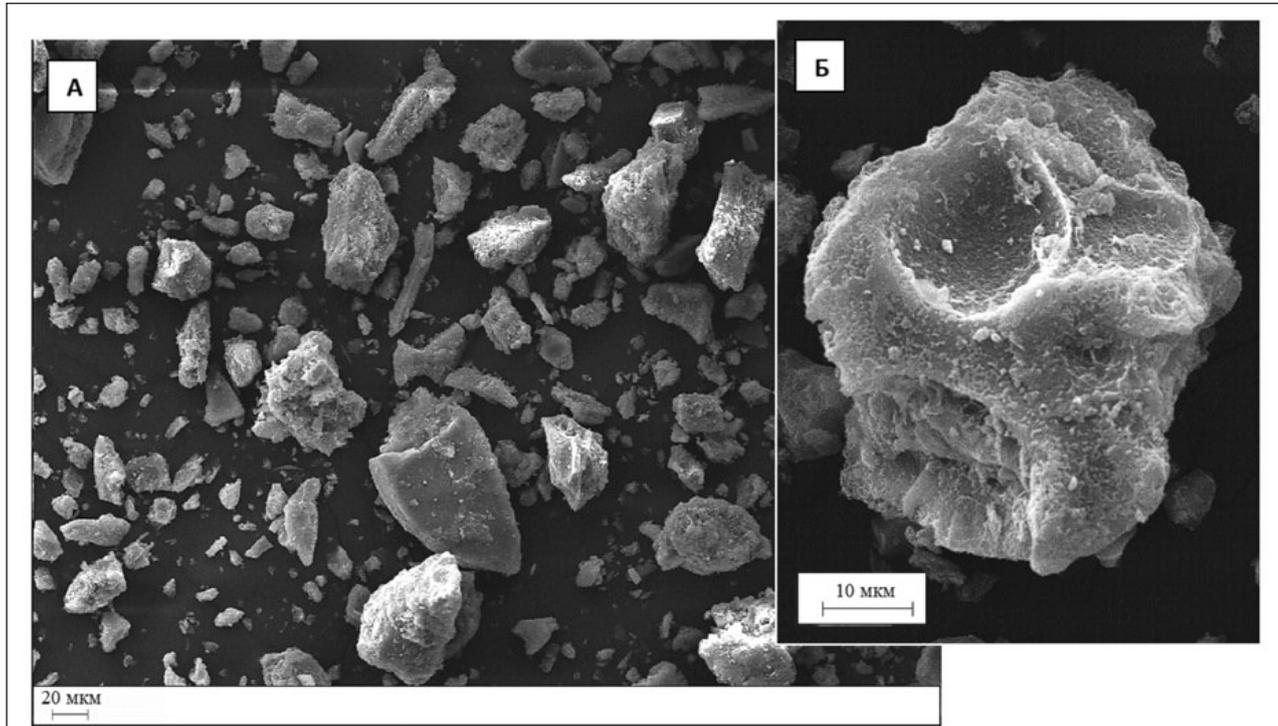


Рис. 15. Морфология частиц грунта мелкодисперсной модели ЛГА-6: А — обломки неправильной формы; Б — «микрократер» на поверхности частицы

Заключение

Подбор гранулометрического состава грунтов, аналогичных лунным реголитам, проводится на базе теории создания искусственных гранулометрических смесей.

Для моделирования смесей используются метод предельных кривых, расчет по усредняющей линии тренда, а также точное создание необходимого гранулометрического состава путем соединения специально подготовленных фракций грунтов-аналогов в требуемых объемах.

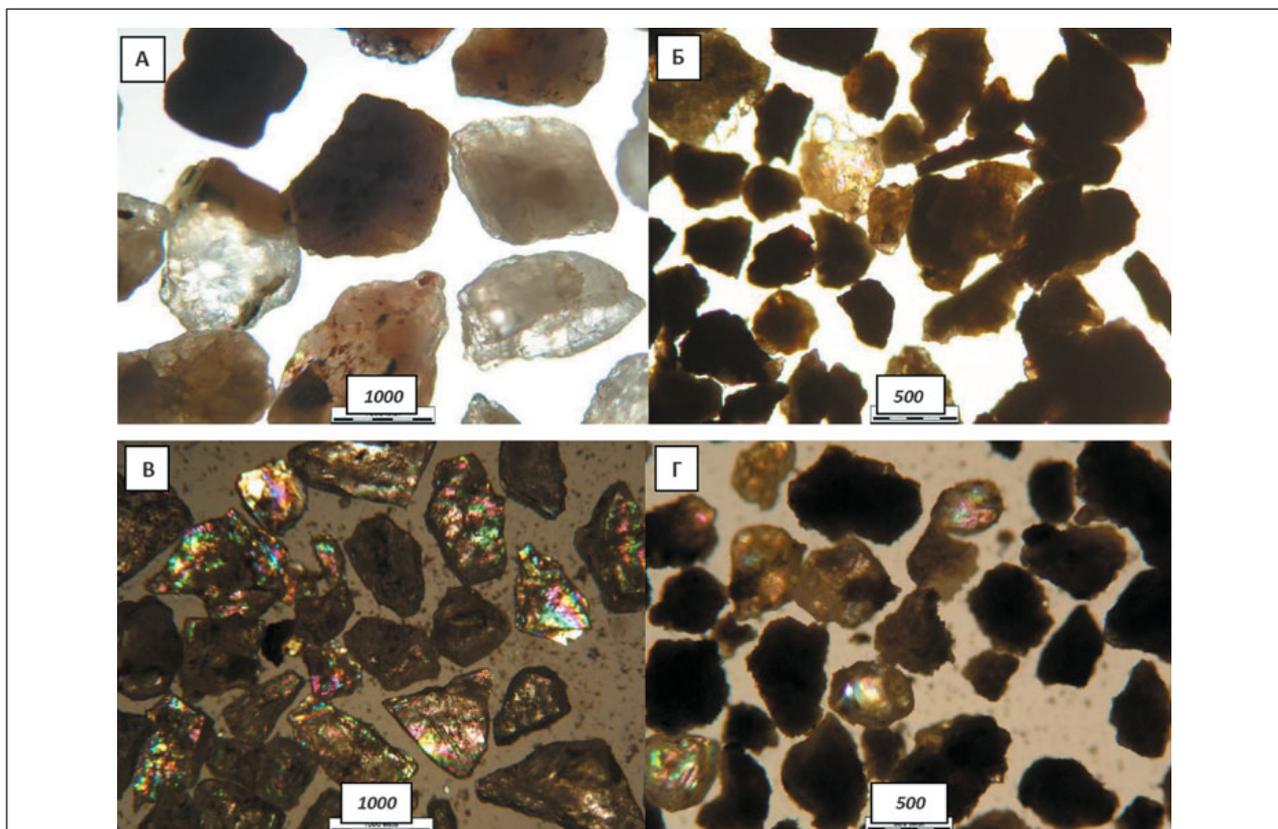


Рис. 16. Морфология частиц преобладающих фракций в составе грунта крупнообломочных моделей ЛГА-7 (А-В) и ЛГА-8 (Г): А — песок крупный (обр. П-17); Б — андезиты фракции 0,25–0,50 мм (обр. АК); В — кварцевая крошка фракции 1–2 мм (обр. КК); Г — молотые туфы фракции 0,25–0,50 мм (обр. ТК). В белых прямоугольниках указано увеличение

Исходными компонентами моделей грунтов-аналогов могут служить как природные, так и техногенные дисперсные грунты. Основным требованием к выбору материалов для моделей является их схожесть с лунными реголитами по гранулометрическому составу, минеральному составу и структурным характеристикам частиц.

Разработано несколько моделей грунтов, которые аналогичны по гранулометрическому составу реголитам из различных районов Луны.

Произведено сравнение микростроения полученных моделей и грунтов из различных районов Луны. На основании этого сделаны выводы об аналогии гранулометрического состава и морфологических характеристик грунтов-аналогов и лунных реголитов. При этом выявлены следующие типы связи:

- морфология частиц моделей мелкодисперсных грунтов-аналогов ЛГА-5 и ЛГА-6 схожа с морфологией частиц зрелых лунных реголитов из морских районов Луны, например из моря Кризисов или моря Спокойствия;
- модель среднedisперсного грунта-аналога ЛГА-9, в которой содержится и большое количество пылеватого материала (вулканического пепла), и гравийных обломков (вулканического шлака), по своему мик-

ростроению является аналогом лунного морского реголита, содержащего большое количество агглютианатов в общей массе пылеватого грунта, например грунта из моря Изобилия или моря Спокойствия;

- более грубозернистые грунты-аналоги — модели ЛГА-7 и ЛГА-8 — аналогичны по своей морфологии реголитам горных районов и кратеров Луны, таких как кратеры Фра-Мауро, Тихо, горы Декарт;
- наиболее грубозернистым реголитам аналогичны грунты моделей ЛГА-1 и ЛГА-2;
- модель ЛГА-3 может использоваться как аналог «усредненного» для разных районов лунного реголита. 

Автор выражает признательность сотрудникам НПО им. С.А. Лавочкина, в частности А.Н. Кудрявцеву, за содействие в выполнении этой работы и ценные замечания, а также студентам и аспирантам кафедры Е.В. Гладковой, А.А. Кузубаеву и В.А. Медведеву за сотрудничество. Особую благодарность автор выражает О.А. Гириной, Ю.В. Фроловой и В.Н. Ладыгину за предоставленные образцы туфогенных пород Камчатки. Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств «Программы развития Московского университета».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладкова Е.В. Создание инженерно-геологической модели лунного грунта // Материалы Всероссийской научно-практической студенческой конференции «Современные исследования в геологии». Санкт-Петербург: Изд-во СНО, 2015. С. 192–194.
2. Гладкова Е.В., Королев В.А. Обоснование инженерно-геологической модели лунного грунта для обеспечения безопасности посадки космических аппаратов // Материалы 2-й Международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности», Воронеж, 12 ноября 2015 г. Том 5. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2015. С. 99–104.
3. Гладкова Е.В., Королев В.А. Применение теории подобия для инженерно-геологического моделирования лунных грунтов-аналогов // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, 24–25 марта 2016 г. Сергеевские чтения. Вып. 18. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. М.: Изд-во РУДН, 2016. С. 592–596. URL: <http://istina.msu.ru/media/publications/article/4cb/f8f/19340128/Glad-SC-2016.pdf>.
4. Королев В.А. Анкерные свойства грунтов-аналогов дисперсных отложений небесных тел земной группы // Материалы Международной научной конференции «Ломоносовские чтения — 2005». М.: Изд-во МГУ, 2005. URL: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1172784>.
5. Королев В.А. Анкерные свойства песчано-гравийных грунтов // Материалы 7-й Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». М.: Изд-во МГГРУ, 2005. С. 82–82.
6. Королев В.А., Кузубаев А.А., Гладкова Е.В. К методике создания инженерно-геологических моделей грунтов Луны и планет // Материалы 8-й Общероссийской конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 13–14 декабря 2012 г. М.: Изд-во ПНИИИС, 2012. С. 25–27.
7. Королев В.А., Трофимов В.Т. Инженерная геология: история, методология и номологические основы. М.: КДУ, 2016. 292 с.
8. Кузубаев А.А., Королев В.А. К вопросу об обосновании инженерно-геологических моделей лунных грунтов // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, 21–22 марта 2013 г. Сергеевские чтения. Вып. 15. Устойчивое развитие: задачи геоэкологии. М.: Изд-во РУДН, 2013. С. 61–65.
9. Кузубаев А.А., Королев В.А. Моделирование лунных грунтов-аналогов // Материалы научной конференции «Ломоносовские чтения», апрель 2013 г. Секция Геология. М.: Изд-во МГУ, 2013. URL: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1187172>.
10. Медведев В.А., Королев В.А. Создание инженерно-геологической модели марсианского реголита // Материалы 10-й научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». М.: Изд-во ПНИИИС, 2014. С. 10–16.
11. Слюта Е.Н. Физико-механические свойства лунного грунта (обзор) // *Астрономический вестник*. 2014. Том 48. № 5. С. 358–382.
12. Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зуангиров Р.С. Грунтоведение / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
13. Carrier W.D. Particle size distribution of lunar soil // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, 2003. V. 129. № 10. P. 956–959.
14. Hollocher K. Moonrocks: lunar geology and petrology // Website of the Geology Department of the Union College Schenectady. New-York, USA, 2003. URL: http://mierva.union.edu/hollochk/c_petrology/moon_rock.
15. Xiao H.L., Huang J. et al. Lunar regolith simulant CUG-1A // *Proceedings of the 41-t Lunar and Planetary Science Conference*, 1–5 March 2010, Woodlands, Texas, 2010. P. 1183.