

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 3 / 2024, Vol. 16, Iss. 3 <https://esj.today/issue-3-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/26SAVN324.pdf>

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Сазонова, С. А. Обзор физико-механических свойств реголита и его имитация на земле / С. А. Сазонова, В. В. Белов, А. В. Гордеев // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/26SAVN324.pdf>

**For citation:**

Sazonova S.A., Belov V.V., Gordeev A.V. Overview of physical and mechanical properties of regolith and its simulation on the ground. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(3): 26SAVN324. Available at: <https://esj.today/PDF/26SAVN324.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 69.001.5; 624.131.31; 624.131; 523.34-1/-8

**Сазонова Светлана Андреевна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
Москва, Россия

E-mail: s.sazonovaa17@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4025-2053>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1150727](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1150727)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58835541000>

**Белов Вячеслав Васильевич**

АО «Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве»,  
Москва, Россия

Заместитель директора по развитию науки

Кандидат технических наук

E-mail: vbelov@pniis.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6246-6100>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=771281](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=771281)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57218418373>

**Гордеев Алексей Владимирович**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
Москва, Россия

Доцент кафедры «Сопrotivления материалов»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: BelovVV@mgsu.ru

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=658874](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=658874)

## Обзор физико-механических свойств реголита и его имитация на земле

**Аннотация.** В данной работе информация об инженерно-геологическом строении Луны. Основное внимание авторов сконцентрировано на рассмотрении лунного грунта деятельного слоя — реголита. Приводятся результаты аналитического обзора основных его характеристик, таких как: плотность, пористость, удельное сцепление, угол внутреннего трения, модуль объемной деформации, сжимаемость, крупность частиц и их форма. Дана общая оценка со строительной позиции относительно возведения сооружений на лунной поверхности.

Также в работе приведены сведения о составах и структуре имитационных материалов, которыми может быть смоделирован реголит в Земных условиях, например, таких как: JSC-1A, MGS-1, LMS-1 и LHS-1.

В результате установлено, что структура коры Луны сложена преимущественно скальными изверженными и метаморфическими породами, такими как — базальты, габбро и брекчия, верхний деятельный слой (реголит) состоит из осколочных продуктов переработки данных пород, с примесью остатком вещества метеоритов. Плотность, пористость, модуль объемной деформации, которого, различна в зависимости от глубины расположения слоя. Сцеплением реголит в рыхлом состоянии не обладает, а угол внутреннего трения сильно меняется в зависимости от состояния (рыхлое или сложенное).

При имитации реголита в Земных условиях следует учитывать, что образцы преимущественно состоят из оксидов алюминия, железа, магния и кальция, каждый из которых занимает менее 10 % от массы самого имитатора.

**Ключевые слова:** строение коры Луны; строение деятельного слоя поверхности Луны; реголит; брекчия; физико-механические свойства реголита; угол внутреннего трения; крупность; сцепление; плотность; имитация реголита на Земле

## Введение

Хозяйственное освоение ближайших к Земле космических тел, является одним из приоритетных направлений общего развития науки и техники разных стран. Так, в частности, Федеральная космическая программа России на 2016–2025 годы (утв. Постановлением Правительства РФ от 23 марта 2016 г. № 230) предполагает создание *«группировки космических аппаратов для проведения углубленных исследований Луны с окололунной орбиты и на ее поверхности»*.<sup>1</sup> Миссией «Artemis» (США, NASA), предусматривается — *«после 2028 года — создание на Луне постоянной базы, рассчитанной на 15 лет эксплуатации»*.<sup>2</sup> В период с 2031–2035 гг., совместным проектом России и Китая, с открытым участием, планируется развернуть международную научную лунную станцию.<sup>3</sup>

Освоение Луны, так или иначе сопряжено со строительством, и потребует изучения инженерно-геологических условий и процессов, происходящих на ее поверхности и в недрах, в том числе совершенствование методов определения<sup>4</sup>, а также обобщение и систематизацию уже известных физико-механических характеристик местного грунта поверхности — реголита, что связано, как с его использованием в качестве строительного материала, из-за доступности, а также, с целью оценки возможности размещения группировки роботизированных комплексов и построек на поверхности спутника Земли.

<sup>1</sup> Постановление Правительства РФ № 230 от 23 марта 2016 года «Федеральная космическая программа России на 2016–2025 годы» [Электронный ресурс], — Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20210731205957/https://www.roscosmos.ru/22347/> (дата обращения: 03.02.2024).

<sup>2</sup> Материалы статьи «Артемиды (космическая программа)» [электронный ресурс]: материалы некоммерческой организации «Фонд Викимедиа» (Wikimedia Foundation, Inc.), режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%80%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D0%B4%D0%B0\\_\(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F\\_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0\)#%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5\\_%D0%B8\\_%D0%BD%D0%B0%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5\\_%D0%90%D1%80%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D0%B4%D1%8B](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%80%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D0%B4%D0%B0_(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0)#%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%B8_%D0%BD%D0%B0%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%90%D1%80%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D0%B4%D1%8B).

<sup>3</sup> Дорожная карта по созданию Международной научной лунной станции [электронный ресурс] // Роскосмос, CNSA, июнь 2021, режим доступ: <https://www.roscosmos.ru/media/files/mnls.pdf>.

<sup>4</sup> Резолюция V Международной научно-практической конференции «Российский форум изыскателей» (18–23 сентября 2023 г.) [электронный ресурс] / Официальный сайт сети «Интернет» — «Ассоциация саморегулируемая организация «Балтийское объединение проектировщиков». — режим доступа: [https://srobop.ru/i/uploads/rezolyutsiya\\_rfi\\_2023.pdf](https://srobop.ru/i/uploads/rezolyutsiya_rfi_2023.pdf).

В современной научной литературе проанализированы свойства образцов лунного грунта, доставленных на Землю в результате различных лунных миссий [1–6], имеются исследования, посвященные моделированию реголита в Земных условиях, при его использовании (в том или ином виде) в качестве строительного материала, для создания лунных баз [7; 8], а также в разные годы активно изучалось строение деятельного слоя поверхности Луны [9; 10].

Однако, информация, содержащаяся в различных источниках, не структурирована должным образом, с позиции возможностей строительного освоения Луны, отсутствует необходимая совокупность с обобщением, для имеющихся материалов, их критический анализ, поэтому, целью данной работы является формирование соответствующего обзора научной и научно-технической информации с точки зрения будущего хозяйственного освоения поверхности Луны. Авторами рассматриваются как сами свойства реголита, так и сведения об его имитации на Земле.

### Материалы и методы

Авторами, были собраны и проанализированы открытые источники научной и научно-технической информации, а также ряд электронных материалов, популяризирующих достижения в части освоения Лунного пространства. Полученные сведения систематизированы и обобщены с позиции будущего строительного освоения Лунного пространства, дана критическая оценка инженерно-геологическим условиям, при освоении Луны, приводятся сведения об основных имитаторах лунного грунта.

### Результаты исследования

На данном этапе изучения Луны, учеными приводится четырёхслойная модель строения ее коры<sup>5</sup> [1; 11], представляющая в основании комплекс скальных коренных изверженных и метаморфических пород (граница на глубине 60 км от дневной поверхности), состоящих из: базальта и габбро для морей, на материках (а также под слоем базальта и габбро морей) — брекчий. Над коренными располагаются раздробленные породы нижнего комплекса (мощность горизонта не постоянна и колеблется от десятков метров до 30 км), еще выше залегает — горизонт реголитовых брекчий (мощность до нескольких метров). Непосредственно дневная поверхность представлена — реголитом, мощностью — от 4 до 5 м на морских участках, и от 10 до 15 м — на материковых [2], образовался он под воздействием ударно-взрывных процессов (связанных с бомбардировкой лунной поверхности космическими камнями и метеоритами) при участии гравитационного перемещения вещества [1].

Реголит представляет собой разнородный обломочно-пылевой грунт. В его составе выделяют обломки пород и минералов скального основания и продукты их ударной переработки. Чем более зрелый реголит, тем меньшая доля приходится на первичные частицы [1]. Так для морских районов обломки первичных частиц представлены базальтами и габбро, материковых — плагиоклазовыми базальтами, габбро-норитами, троктолитами,

<sup>5</sup> Луна [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/luna-f8c129?ysclid=lu5rz78rdd174917462> (дата обращения: 24.03.2024).

Демидова С.И. Лунные метеориты и вещественный состав лунной коры: специальность 25.00.09 — геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Демидова Светлана Ивановна; ГЕОХИ РАН. — Москва, 2011. — 27 с. — Библиогр.: с. 27. — Место защиты: ГЕОХИ РАН. Текст: электронный. — URL: [https://si.sseu.ru/sites/default/files/2022/09/oformlenie\\_spiska\\_literatury.pdf?ysclid=lu5s6bzoix450089698](https://si.sseu.ru/sites/default/files/2022/09/oformlenie_spiska_literatury.pdf?ysclid=lu5s6bzoix450089698), (дата обращения: 24.03.2024).

габбро-анортозитами и анортозитами [1]. Продукты ударной переработки, вторичные частицы, представлены — реголитовыми брекчиями, стеклами, шлаками, аглютинатами, а также внелунным веществом [1]. Форма частиц изменяется от сферической до сильно вытянутой, при этом продолговатые частицы чаще всего ориентированы в одном направлении, что определяет анизотропию свойств самого реголита [2]. По гранулометрическим характеристикам типичный реголит схож с плохо отсортированным песчано-алевритовым грунтом с примесью щебня и глыб. Медианный размер частиц изменяется в пределах от 40 до 130 мкм со средним значением в 70 мкм [1; 2].

Мелкие частицы подвержены процессам аглютинации и спатеринга [2] (аглютинация — представляет собой разбрызгивание и налипание стекла на поверхность при ударе, спатеринг — эрозия поверхности в результате ионизирующего облучения ионами солнечного ветра и галактическими космическими лучами [2]).

В результате исследования 21 образца, доставленного экспедицией «Apollo-17» было выявлено, что единой закономерности изменения размерного состава с глубиной не существует, и он определяется конкретной геологической ситуацией, а также историческими особенностями формирования слоя на фактическом участке (так, например, свойства реголита отчетливо различаются на равнине между кратерами, на валах кратеров и на внутренних стенках кратеров) [1; 2].

По данным миссий «Луна-16», «Луна-20» и «Луноход-1, -2», в слое толщиной 100 мм плотность грунта изменяется от 1 120 до 1 700 кг/м<sup>3</sup> со средним значением около 1 500 кг/м<sup>3</sup> [2]. По отпечаткам следов астронавтов (миссия «Apollo-11») объёмный вес поверхностного слоя реголита между кратерами составил — 1 450–1 570 кг/м<sup>3</sup>, а на валах кратеров — 1 340–1 570 кг/м<sup>3</sup> (соответственно) [2].

В результате экспедиций «Apollo-15», «-16» и «-17» было проведено бурение на глубину порядка 3 000 мм с диаметром керна — 20,4 мм [2]. Среднее значение объёмного веса реголита на поверхности составило 1 300 кг/см<sup>3</sup>, глубже 600 мм возрастание плотности — незначительное [2].

Среднее значение пористости превышает 50 % (в верхнем слое толщиной около 150 мм), на глубине 30–600 мм — снижается до 44 % [2]. Большее значение наблюдается на валах кратеров [2].

Когезионные свойства реголита проявляются в легком его слипании, он вполне комкуется и держит вертикальные стенки небольшой высоты, адгезионные свойства — в налипании на поверхности (металлические и минеральные, а также пластмассовые) [1].

Ниже, в таблице 1, представлены основные физико-механические характеристики реголита.

В предельно рыхлом состоянии реголит обладает высокой сжимаемостью, что свидетельствует о довольно низком модуле объёмной деформации [2]. При этом на валах кратеров, эта характеристика ниже примерно в 5 раз, по отношению к горизонтальным участкам и склонам кратеров [2]. По трассе Лунохода-1 модуль объёмной деформации находился в пределах от 19,6 до 98 кПа [2], а сопротивление вращательному срезу изменялось от 2 до 9 кПа [2].

Общие деформационные характеристики свойств реголита [1]: особо не зависят от региональной геологической ситуации (море или же материк); сильно варьируют в меняющихся местных геологических условиях; возрастают с глубиной (что связано, с большим уплотнением грунта при их приближении к коренным породам).

В рыхлом состоянии реголит имеет незначительное сцепление и малый угол внутреннего трения, так: при объёмном весе, равном —  $1\ 290\ \text{кг/м}^3$ , угол внутреннего трения составляет —  $10\text{--}12^\circ$ ; при  $1\ 500\ \text{кг/м}^3$  —  $25^\circ$ ;  $1\ 610\ \text{кг/м}^3$  —  $46^\circ$  [2]. Также, при увеличении плотности возрастает общее сопротивление сдвигу, за счет увеличения когезии [2].

Таблица 1

**Физико-механические свойства лунного грунта**

Характеристика	Ед. изм.	Значение	Примечание	Источник	
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	1 500	В слое толщиной 100 мм	Миссии «Луна-16», «Луна-20», «Луноход-1, -2»	
	кг/м <sup>3</sup>	1 450–1 570	Поверхностный слой	Миссия «Apollo-11»	
		1 340–1 570	На валах кратеров		
	кг/м <sup>3</sup>	1 300	Керн диаметром 20,4 мм, глубиной порядка 3 000 мм	Миссия «Apollo-15, -16, -17»	
	г/см <sup>3</sup>	0,99	0,99	При коэф. пористости 2,12	К.П. Флоренский, 1975 г.
			1,43	При коэф. пористости 1,17	
			1,6	При коэф. пористости 0,94	
			1,7	При коэф. пористости 0,82	
	г/см <sup>3</sup>	1,87	1,87	При коэф. пористости 0,66	
			1,3	Поверхностный слой	
			1,5	На глубине 15 см	
			1,66	На глубине 60 см	
г/см <sup>3</sup>	1,9	1,9	На глубине 200 см		
		—	До глубины 200 см		
Изменение плотности	—	—	До глубины 200 см	Е.Н. Слюта, 2014 г.	
Пористость грунта	%	52 ±2	Поверхностный слой 0–15 см		
		44 ±2	На глубине 30–60 см		
Изменение пористости	%	≤ 40	До глубины 200 см		
Содержание (%) частиц больше заданного размера в типичном лунном реголите	%	1	> 841 мкм		
		15	> 250 мкм		
		35	> 105 мкм		
		50	> 53 мкм		
		78	> 20 мкм		
Модуль деформации грунта	кПа	15,6–29	Поверхностный слой		
		240	На глубине до 200 см		
Изменение модуля деформации	кПа	15,6–240	До глубины 200 см		
Коэффициент Пуассона грунта (среднее значение)	—	0,2	До глубины 200 см		
Прочность грунта на сдвиг	кПа	0,1–2,5	На глубине 5 см		
		1–3,5	На глубине 50 см		
		2–4	На глубине 100 см		
		4–8	На глубине 200 см		
Изменение прочности грунта на сдвиг	кПа	0,1–8	До глубины 200 см		
Когезия частиц (среднее значение)	кПа	0,52	На глубине 0–15 см		
		0,6	На глубине 10–20 см		
		0,9	На глубине 0–30 см		
		3,0	На глубине 30–60 см		
		1,6	На глубине 0–60 см		
Изменение когезии частиц	кПа	0,1–3,5	До глубины 200 см		
Изменение угла внутреннего трения	°	30–50	До глубины 200 см		

Источник [1; 2]

Анализ физико-механических свойств реголита в рыхлом состоянии, показывает, что он обладает высокой сжимаемостью. При увеличении плотности (снижении пористости) повышается связность грунта, как следствие растет — сцепления и угол внутреннего трения,

довольно резко уменьшается коэффициент сжимаемости. Кроме того, основными отличительными свойствами реголита, является: низкая теплопроводность; высокие адгезионные и когезионные свойства; отсутствие несвязанной воды и других летучих; высокая обогащенность размерной фракции частиц в десятки микрон, поверхность которых активирована космическим радиационным облучением; обогащенность стеклом, в некоторых местах — тяжелыми рудными материалами (ильменитом) [2].

Таким образом, при расположении на поверхности Луны строительных объектов, особенно обладающих значительной массой и малой площадью опирания, следует учитывать прежде всего, возможные чрезмерные осадки, причем в виде преимущественно просадочных деформаций.

Хорошие теплофизические свойства реголита, связанные с низкой теплопроводностью, а также наличие в структурном составе тяжелых рудных элементов, базальта и прочих плотных осколков, в целом, при хозяйственном освоении поверхности Луны делает его весьма привлекательным для использования, в качестве первичного основного строительного материала, например — формирование экранов защиты от ионизирующего излучения космической радиации, падения камней и ряда других, так как транспортировка насыпных грузов с помощью ракетносителей финансово неэкономична<sup>6</sup> [12].

Однако, очевидно, что для полномасштабного и всестороннего исследования характеристик лунного грунта, и экспериментов с ним, требуется его значительное количество, которого нет, в достаточном объеме на Земле, это, приводит к необходимости развития направлений, связанных с имитацией реголита в Земных условиях.

Так в работах [13]<sup>7</sup> показаны наиболее распространенные имитаторы реголита, которыми является: тип «JSC-1A», сертифицированный NASA, а также тип — «MGS-1». Указанные имитаторы механически и химически схожи с образцами, полученными миссией «Аполлон», и состоят преимущественно из оксидов — алюминия, железа, магния и кальция, каждый из которых занимает менее 10 % от массы имитатора. Размеры частиц варьируются в диапазоне от 100 до 250 мкм. Плотность имитатора — 2 900 кг/м<sup>3</sup>, его удельное сцепление — от 1 до 5 кПа, угол внутреннего трения — 43–48°, модуль объемной деформации — 18–60, 65–110 Мпа [13].<sup>7</sup>

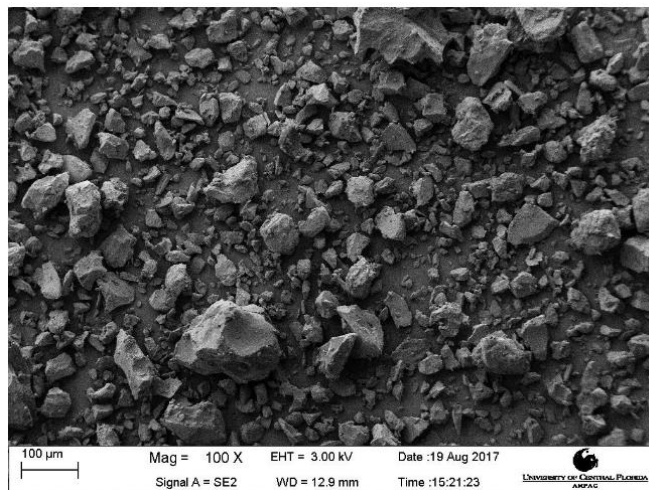
Вид на с имитированный в Земных условиях реголит, приводится на рисунке 1.

Во многих научных работах имитаторы лунного грунта получены за счет измельчения земных горных пород с добавлением стекла, выступающего в роли агглютината. В [14] было предложен двухэтапный способ создания имитатора реголита. На первой стадии происходит измельчение базальтовой крошки (которая в свою очередь, является основой), и порошка измельченной базальтовой ваты — агглютината. Вторая стадия — характеризуется смешиванием основы и агглютината в объемной пропорции 1 к 1 000, соответственно. Химический состав исследованных образцов имитатора включает в себя элементы: Mn (0,17 %), Ca (13 %), Si (56 %), Al (16 %), K (4 %), Ti (1,5 %) и Fe (9 %).

<sup>6</sup> Paul D. Spudis. Regolith, The “Other” Lunar Resource [Электронный ресурс]. // AIR & SPACE MAGAZINE, January 5, 2011. — Режим доступа: <https://www.smithsonianmag.com/air-space-magazine/regolith-the-other-lunar-resource-156943194/> (дата обращения: 24.03.2024).

Из реголита и солёной воды научились изготавливать кирпичи для лунных поселений. — Текст: электронный. // Архитектура и строительство. Космос, 02.11.2022 г. — URL: <https://22century.ru/space/111573?ysclid=lu5iswrkf3728233762> (дата обращения: 24.03.2024).

<sup>7</sup> Astromaterials Research & Exploration Science. — URL: <https://ares.jsc.nasa.gov/projects/simulants/jsc-1-1a.html> (дата обращения: 17.05.2024). — Текст: электронный.



**Рисунок 1.** Изображение имитатора реголита [13]

Некоммерческая лаборатория Exolith Lab, управляемая Университетом Центральной Флориды, производит имитаторы лунного грунта морского («LMS-1») и горного («LHS-1») реголита. Последний состоит из — анортозита (74,4 %), богатого стеклом базальта (24,7 %), ильменита (0,4 %), пироксена (0,3 %) и оливина (0,2 %), а морского из — пироксена (32,8 %), богатого стекло базальта (32 %), анортозита (19,8 %), оливина (11,1 %) и ильменита (4,3 %). Диапазон размеров частиц обоих имитаторов составляет 0–1 мм, насыпная плотность горного — 1 300 кг/м<sup>3</sup>, а морского — 1 560 кг/м<sup>3</sup>, соответственно [15].

### Заключение

В результате общего анализа научно-технической информации о геологическом строении Луны, физико-механических свойствах грунта деятельного слоя, и возможностях его использования, установлено следующее:

- Инженерно-геологическое строение коры Луны представлено 4-мя основными слоями, такими как — комплекс скальных коренных изверженных и метаморфических пород (базальты, габбро, брекчия), над которыми залегают раздробленные породы нижнего комплекса, затем следует горизонт реголитовых брекчий, деятельный слой — представлен реголитом.

- Лунный грунт, преимущественно состоит из частиц базальта, габбро, плагиоклазового базальта, габбро-норита, троктолита, габбро-анортозита, анортозита, включая продукты ударной переработки — реголитовые брекчии, стекло, шлак, аглоutinаты, а также внелунное вещество (например, такое как: ильменит). Форма частиц изменяется от сферической до сильно вытянутой, при этом продолговатые частицы чаще всего ориентированы в одном направлении. Медианный размер частиц изменяется в пределах от 40 до 130 мкм. Плотность реголита различна при движении от дневной поверхности Луны к ее глубине коры, так в приповерхностном 10-ти см слое она в среднем составляет — около 1 500 кг/м<sup>3</sup>, на глубине до 3-х м — 1 300 кг/м<sup>3</sup> (данные миссий «Apollo-15», -16 и -17), вместе с тем имеются сведения, о том, что она возрастает с глубиной (от 15 см до 2-х м). Пористость в среднем около 50 %, с некоторым незначительным снижением на глубине 600 мм. Модуль объемной деформации, довольно низкий от 0,016 (в приповерхностном слое) до 0,24 МПа, возрастает с глубиной. Сопротивление вращательному срезу от 2 до 9 кПа. Сцеплением в рыхлом состоянии — не обладает, а угол внутреннего трения сильно меняется в зависимости от состояния (рыхлое или сложенное) от 10 до 50°.

- В целом, реголит обладает высокой сжимаемостью в рыхлом состоянии, анизотропией физико-механических свойств, низкой теплопроводностью, вполне комкуется и держит вертикальные стенки небольшой высоты, а также способен налипать на поверхности. Таким образом, при размещении на поверхности Луны строительных объектов обладающих значительной массой и малой площадью опирания, следует учитывать возможные чрезмерные осадки (просадочные деформации) и их неравномерность, поэтому рекомендуется принимать относительно простые конструктивные формы сооружений, или же снижать общую нагрузку в основании. Для различных засыпок, когда реголит используется, например, в защитных экранах лунных баз, следует учитывать его малый коэффициент внутреннего трения в разуплотненном (рыхлом) состоянии, что естественным образом скажется на общей геометрии сооружения, и увеличит пятно застройки в целом.

- При имитации реголита в Земных условиях следует учитывать, что по гранулометрическим характеристикам он схож с плохо отсортированным песчано-алевритовым грунтом с примесью щебня и глыб. Сертифицированные NASA имитационные образцы преимущественно состоят из оксидов алюминия, железа, магния и кальция, каждый из которых занимает менее 10 % от массы самого имитатора. Существует двухэтапный способ создания имитатора реголита из базальта, а также лабораторий Exolith Lab (США, Флорида), предлагается имитация горного и морского реголита. При этом в обоих случаях, химической основой служат: кальций, кремний, алюминий и железо. Следует заметить, что анортозит, используемый в имитации Лунного реголита, был найден во всех пробах миссии «Apollo-15», а затем на Земле [16].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги // Академия наук СССР, Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского, 1975. — 50 с.
2. Слюта Е.Н. Физико-механические свойства лунного грунта (обзор) // *Астрономический вестник*. — Т. 48. — № 5. — 2014. — с. 358–382. — DOI 10.7868/S0320930X14050053.
3. Черкасова Л.И. Исследования грунтов Луны. История и перспективы // *Вестник МГСУ*. — вып. 5/2011. — 2011. — с. 301–305.
4. Слюта Е.Н., Маров М.Я., Дунченко А.Г., Маковчук В.Ю., Морозов О.В., Назаров А.И., Иванов В.В., Погонин В.И., Роскина Е.Г., Сафронов В.В., Харлов Б.Н., Таций Л.П. Эксперимент ТЕРМО-ЛР на посадочном аппарате Луна-27: изучение теплофизических, физико-механических и электромагнитных свойств лунного грунта // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. — Т. 55. — № 5. — 2021. — с. 454–475. — DOI 10.31857/S0320930X21050054.
5. Шевченко В.В., Лу Я., Скобелева Т.П. Сравнение физико-химических свойств поверхности в районах работы самоходных космических аппаратов Луноход-1 и Yutu на Луне // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. — Т. 50. — № 2. — с. 91. — 2016, — DOI 10.7868/S0320930X16020067.

6. Кугубаев А.А., Королев В.А. К вопросу об обосновании инженерно-геологических моделей лунных грунтов // Сергеевские чтения. Устойчивое развитие: задачи геоэкологии (инженерно-геологические, гидрогеологические и геокриологические аспекты): Молодежная конференция. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Москва, 21–22 марта 2013 года / Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. — М.: Российский университет дружбы народов. — Выпуск 15. — 2013. — с. 61–65.
7. Кочнев К.В., Ненарокомов А.В. Моделирование процесса спекания лунного реголита. Анализ расчетно-экспериментального метода идентификации математической модели теплопереноса // Тепловые процессы в технике. — Т. 15. — № 2. — 2023. — с. 51–61, — DOI: 10.34759/tpt-2022-15-2-51-61.
8. Schreiner Samuel, Dominguez Jesus, Sibille Laurent, Hoffman Jeffrey. Thermophysical Property Models for Lunar Regolith // Advances in Space Research. — 57(5). — 2015. — DOI: 10.1016/j.asr.2015.12.035, — режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/288918105\\_Thermophysical\\_Property\\_Models\\_for\\_Lunar\\_Regolith](https://www.researchgate.net/publication/288918105_Thermophysical_Property_Models_for_Lunar_Regolith) (дата обращения: 24.03.2024).
9. Черкасов И.И., Шварев В.В. Грунт Луны. — М.: Издательство "Наука", 1975. — 143 с.
10. Гусев А.В., Петрова Н.К., Ханада Х. Вращение, физическая либрация и внутренне строение активной и многослойной Луны. — Казань: Изд-во Казанского федерального университета, 2015. — 323 с.
12. Галкин И.Н., Шварев В.В. Строение Луны // Новое в жизни, науке и технике. Серия "Космонавтика, астрономия" № 2. — М.: "Знание", 1977. — 14 с.
13. Игнатова А.М., Игнатов М.Н. Использование ресурсов реголита для освоения лунной поверхности // Международный журнал экспериментального образования. — 2013. — № 11-2. — с. 101–110, — режим доступа: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=4325> (дата обращения: 24.03.2024).
14. Kevin Grossman. Regolith-Based Construction Materials for Lunar and Martian. — Electronic Theses and Dissertations, 6165 / University of Central Florida, 2018, — режим доступа: <https://stars.library.ucf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=7165&context=etd> (дата обращения: 24.03.2024).
16. Александров П.А., Васильев А.Л., Калечиц В.И., Капустин Ю.В., Ключев В.В., Макавеев П.Ю., Пацаев Т.Д., Шахов М.Н. Разработка имитатора лунного грунта и пыли для наземных экспериментов // Альманах современной метрологии, — № 1(33). — 2023. — с. 265–271.
17. Long-Fox, Jared & Britt, Daniel. Characterization of planetary regolith simulants for the research and development of space resource technologies. — DOI: 10.3389/frspt.2023.1255535. — Текст: электронный // Frontiers in Space Technologies. — 2023, — URL: [https://www.researchgate.net/publication/374282680\\_Characterization\\_of\\_planetary\\_regolith\\_simulants\\_for\\_the\\_research\\_and\\_development\\_of\\_space\\_resource\\_technologies](https://www.researchgate.net/publication/374282680_Characterization_of_planetary_regolith_simulants_for_the_research_and_development_of_space_resource_technologies) (дата обращения: 20.05.2024).
18. Анортозиты Земли и Луны / [редколлегия: А.В. Пейве (главный редактор) и др.]. — Москва: Наука, 1984. — 272 с.

### **Sazonova Svetlana Andreevna**

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

E-mail: s.sazonovaa17@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4025-2053>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1150727](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1150727)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58835541000>

### **Belov Vyacheslav Vasil'evich**

Geological Research Institute for Construction, Moscow, Russia

E-mail: vbelov@pniis.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6246-6100>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=771281](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=771281)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57218418373>

### **Gordeev Alexey Vladimirovich**

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

E-mail: BelovVV@mgsu.ru

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=658874](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=658874)

## **Overview of physical and mechanical properties of regolith and its simulation on the ground**

**Abstract.** This paper provides information on the engineering and geologic structure of the Moon. The main attention of the authors is concentrated on the lunar soil of the active layer — regolith. The results of analytical review of its main characteristics, such as: density, porosity, specific cohesion, internal friction angle, bulk modulus, compressibility, particle size and shape are given. A general assessment from the construction position regarding the erection of structures on the lunar surface is given.

Also, the paper provides information on the composition and structure of simulation materials that can be used to model the regolith in Earth conditions, such as JSC-1A, MGS-1, LMS-1 and LHS-1.

As a result, it was found that the crust structure of the Moon is composed mainly of rocky eruptive and metamorphic rocks, such as basalts, gabbro and breccia, the upper active layer (regolith) consists of fragmentary products of processing of these rocks, with an admixture of meteorite residue. Its density, porosity, and bulk deformation modulus vary depending on the depth of the layer. Regolith in loose state has no cohesion, and the angle of internal friction varies greatly depending on the state (loose or folded).

When simulating regolith in Earth conditions, it should be taken into account that the samples mainly consist of aluminum, iron, magnesium, and calcium oxides, each of which occupies less than 10 % of the mass of the simulator itself.

**Keywords:** structure of the Moon crust; structure of the active layer of the Moon surface; regolith; breccia; physical and mechanical properties of regolith; angle of internal friction; coarseness; cohesion; density; imitation of regolith on Earth