

Рассмотрение вулканических пеплов полуострова Камчатка как грунтов-аналогов лунного грунта.

Научный руководитель – Слюта Евгений Николаевич

Уварова Александра Владимировна

Сотрудник

Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

E-mail: uvarova@geokhi.ru

Введение: зарубежные имитаторы лунного грунта, такие как JSC-1A для морских областей и NU-LHT для материковых областей, хорошо моделируют физические свойства. Основным недостатком этих имитаторов является их высокая стоимость, которая составляет около 20 000 долларов за тонну [1]. Последующие GRC-1 и GRC-3 имитаторы были дешевле, около 250 долларов за тонну [2], [3], но они не имитируют морфологию частиц лунного грунта. Нашей лабораторией разработан грунт-аналог VI-75, созданный из доступных материалов [4], он хорошо моделирует физические и механические свойства, но не химический состав. В связи с этим основной целью данного исследования является рассмотрение нескольких видов пеплов с вулканов Толбачик, Горелый и Мутновский, а также Халактырского пляжа в качестве грунта-аналога лунных пород и их сравнение с данными реального лунного реголита. На начальном этапе отбора в качестве основных критериев выбраны показатели плотности и механических свойств: угол внутреннего трения и сцепление.

Описание физических и механических свойств лунного реголита: типичный лунный реголит по гранулометрическим характеристикам представляет собой плохо отсортированный песчано-алевритовый грунт с примесью щебня и глыб. Естественная плотность лунного реголита на поверхности до глубины 15 см согласно данным с миссий КА Луна-16, Луна-20, изменяется от 1,12 до 1,7 г/см³ со средним значением около 1,5 г/см³. Среднее значение плотности реголита на поверхности, согласно данным с миссий Аполлонов, также равно 1,3 г/см³, но потом резко возрастает с глубиной по гиперболической зависимости. Глубже 60 см плотность грунта реголита возрастает незначительно, и на глубине около 3 м приближается к значению 1,92 г/см³ [5],[6].

Оценка учеными [7] устойчивости скважин от осыпания миссий Аполлон-16 и Аполлон-17 показала, что удельное сцепление в местах посадок равно 1,1 - 1,8 кПа и угол внутреннего трения равен 46,5°. Луноходом-2 в кратере Лемонье у восточного побережья Моря Ясности, также были измерены параметры: удельное сцепление - 0,40 кПа, угол внутреннего трения - 40°[8].

Экспериментальные исследования лунного грунта, доставленного с мест посадок пилотируемых экспедиций, также показали сильную зависимость сцепления и угла внутреннего трения от плотности грунта и, соответственно, от глубины залегания. При изменении плотности с 0,99 по 1,87 сцепление изменялось в пределах 0,3 - 3,0 кПа и угол внутреннего трения 13 - 56°[8].

Таким образом, лунный реголит имеет диапазон плотности в пределах 1,3 - 1,9 г/см³, угол внутреннего трения в зависимости от плотности изменяется от 13 до 56° и сцепление 0 до 3 кПа.

Методы: одноплоскостной срез как эксперимент основан на теории Мора - Кулона: разрушение пород происходит при определенном соотношении нормальных и касательных

напряжений, между собой они связаны линейно, и коэффициентами уравнения прямой являются тангенс угла внутреннего трения и сцепление [4].

Нормальное напряжение задавалось в зависимости от плотности образцов в пределах от 10 кПа до 50 кПа для рыхлых и от 50 до 200 кПа для плотных образцов. Касательная нагрузка определялась как максимальное напряжение, при котором разрушался образец. Скорость разрушения составляла 2 мм/мин.

Результаты: образцы Камчатского пепла представляли собой песчаные грунты с примесью пыли и грубозернистой фракции, в разных соотношениях, что близко по описанию к лунным породам. Всего было рассмотрено 5 образцов: Горелый (нижняя часть склона), Горелый (1390) (верхняя часть склона), Характерский пляж, Мутновский, Толбачик. Образцы имели разный диапазон плотности и, следовательно, прочностные характеристики, как демонстрирует табл. 1.

Все образцы имеют значения угла внутреннего трения, сопоставимые со значениями лунного грунта, однако удельное сцепление у всех образцов намного превышает сцепление реголита при плотном сложении.

Диапазон плотности у всех образцов также полностью не соответствует лунному, однако образцы вулканов Мутновский, Горелый близки по свойствам к приповерхностному слою лунного реголита.

На данном этапе исследований результаты показывают, что пеплы с вулканов могут быть использованы для отработки приземления посадочных аппаратов, что было реализовано ранее для луноходов. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение химического и минерального состава, чтобы предполагаемый грунт-аналог подходил также по химическому составу к лунным породам.

Источники и литература

- 1) Atsagortsyan Z.A., Akopyan G.G., Sarkisov R.R., Cherkasov I.I., Shvarev V.V. To the creation of an analogue of lunar soil // Modern Ideas about the Moon, Nauka, Moscow, 1972, pp. 113–116.
- 2) Oravec H.A., Zeng X., Asnani V.M. Design and characterization of GRC-1: a soil for lunar terramechanics testing // Earth-ambient conditions, J. Terramechanics 47 (6), 2010, pp.361–377.
- 3) He C., Zeng X., Wilkinson A. Geotechnical properties of GRC-3 lunar simulant, J. Aero. Eng. 26 (3), 2013, pp 528–534.
- 4) Slyuta E.N., Grishakina E.A., Makovchuk V. Yu, Agapkin I.A. Lunar soil analogue VI-75 for large-scale experiments. // Acta Astronautica.. 2021, V. 187, pp. 447-457
- 5) Carrier W. D Lunar soil grain size distribution // The Moon. 1973, V. 6, pp. 250-263.
- 6) Carrier W.D. III et al. Physical properties of the lunar surface // Lunar Sourcebook /. Heiken G. Vaniman D., French B.M.. - Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1991, pp. 475-594.
- 7) Mitchell J.K. et al. Mechanical properties of lunar soil: density, porosity, cohesion, and angle of friction // Proc. 3rd Lunar Sci. Conf., 1972, pp. 3235-3253.
- 8) Slyuta E. N. Physical and mechanical properties of the lunar Soil (A review). Sol. Sys. Res. 2014, 48(5), 330-353.

Иллюстрации

Сопоставление свойств пеплов с п-о Камчатка и лунного грунта

	Плотность г/см³	Угол внутреннего трения, °	Сцепление, кПа
Толбачик	0,89 – 1,04	41,7 – 46,1	5,4 – 57,5
Мутновский	1,17 – 1,46	42 – 51,5	2,2 – 19,5
Горелый	1,17 – 1,44	29,7 – 36,1	2,8 – 20
Горелый (1390)	1,05 – 1,37	33,3 – 39,2	1,3 – 16,2
Халактырский пляж	1,60 – 1,81	28,3 – 41,1	1,3 – 17,9
Лунный реголит	1,3 – 1,9	13 – 56	0,3 – 3

Рис. 1. Таблица 1