

THE CREATION OF A LUNAR COSMODROME BY THE METHOD OF REGOLITH FUSING ON A MONOLITHIC SURFACE

Alexander V. BAGROV,

PhD, Dr. Sci. (Astronomy), leading scientist, Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia, leading engineer, Lavochkin Association, Moscow, Russia, abagrov@inasan.ru

Vladislav A. LEONOV,

Cand. Sci. (Physics and Mathematics), research scientist, Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia, leonov@inasan.ru

ABSTRACT | The trajectory of soft lunar landing is strictly vertical, therefore the place of landing can be minimal in size. At the surface of the Moon the jet stream of brake engines blows off lunar dust which forms a cloud around the place of landing. All particles of lunar dust have sharp sides and have abrasive properties. Brought in habitable volume (e.g. on space suits or wearable objects), dust becomes dangerous to cosmonauts' health. In order to minimize dust pollution during lunar landing the creation of a dustless monolithic platform (cosmodrome) is suggested. The cosmodrome of 100×100 meters in size with a monolithic basalt covering 0.1 m thick can be constructed by one solar-powered automated building 3D-printer in 250 lunar days.

Keywords: *Moon, regolith, lunar dust, space navigation, cosmodrome, building 3D-printer*



СОЗДАНИЕ КОСМОДРОМА НА ЛУНЕ МЕТОДОМ НАПЛАВЛЕНИЯ РЕГОЛИТА НА МОНОЛИТНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ



Александр Викторович БАГРОВ,
доктор физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник Института астрономии РАН, Москва, Россия,
ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», Москва, Россия,
abagrov@inasan.ru.



Владислав Александрович ЛЕОНОВ,
кандидат физико-математических наук, научный
сотрудник Института астрономии РАН, Москва, Россия,
leonov@inasan.ru.

АННОТАЦИЯ | Мягкая посадка на поверхность Луны осуществляется строго по вертикальной траектории, поэтому место посадки может иметь минимальный размер. Непосредственно у поверхности Луны реактивная струя тормозных двигателей сдувает лунную пыль, которая образует облако вокруг места посадки. Все частицы лунной пыли имеют острые грани и обладают абразивными свойствами. Занесенная в обитаемый объем на скафандрах или носимых предметах, пыль становится опасной для здоровья космонавтов. Для минимизации пылеобразования при посадке аппаратов на Луну предлагается создание беспылевой монокристаллической площадки (космодрома). Космодром размером 100×100 м с толщиной монокристаллического базальтового покрытия 0,1 м может быть построен одним автоматизированным строительным 3D-принтером на солнечной энергии за 250 лунных дней.

Ключевые слова: Луна, реголит, лунная пыль, навигация в космосе, космодром, строительный 3D-принтер

Все планы России и других стран по освоению ресурсов Луны предусматривают создание на ее поверхности постоянных баз и периодические (или постоянные) пилотируемые экспедиции к ним. В отсутствие атмосферы на Луне мягкая посадка космических аппаратов на лунную поверхность может осуществляться с помощью реактивных двигателей, причем энергетически выгодно, чтобы максимальное торможение аппарата происходило непосредственно перед посадкой. При этом тормозными двигателями неизбежно будут подниматься облака пыли, находящейся на поверхности Луны.

Типичная пылинка на лунной поверхности состоит из множества спаянных в сложную структуру стекол и микростеклянок, каждый из которых имеет острые грани, расположенные под разными углами. Подобная пыль субмикронных размеров легко сцепляется даже с самыми гладкими поверхностями, после чего вся поверхность становится абразивной.

На рис. 1 показаны типичные формы пылинок с лунной поверхности [2]. Каждая пылинка состоит из множества спаянных в сложную структуру стекол и микростеклянок, причем каждый из них имеет острые грани, расположенные в пылинке под разными углами. Подобная пыль субмикронных размеров легко сцепляется даже с самыми гладкими поверхностями, после чего покрытая пылью поверхность становится абразивной. Всякое трение с нею приводит к интенсивному износу поверхностей.

Кроме того, в отсутствие атмосферы пылинки под действием ионизирующего солнечного излучения легко приобретают и подолгу сохраняют электрический заряд, из-за которого лунная пыль «левитирует» над поверхностью [2]. Левитирующая пыль даже создает нечто вроде «пылевой атмосферы» Луны.

Заряженные пылинки легко прилипают ко всем поверхностям космических аппаратов. Астронавты НАСА, перемещаясь по поверхности Луны, неоднократно падали, из-за чего их скафандры оказывались изрядно перепачканы лунной пылью (рис. 2).

Во время проведения первых пилотируемых миссий на Луну свойства вещества лунной поверхности не были известны. В конструкции космических кораблей «Аполлон» не были предусмотрены переходные тамбуры для изоляции кабины с пилотами от загрязнений, которые могли быть принесены в нее на скафандрах после возвращения астронавтов с экскурсий по поверхности Луны. Хотя астронавты пытались по возможности очистить свои скафандры, они занесли лунную пыль в посадочный модуль. Оказавшись в кабине, пыль загрязнила в ней воздух и через дыхательные пути попала в организмы космонавтов, последствия чего были весьма неприятными. Все астронавты жаловались на жжение в горле, кожный зуд и головные боли. Характер токсичного воздействия лунной пыли на человеческий организм пока не полностью изучен, но совершенно ясно, что борьба с нею будет сложной задачей при организации будущих экспедиций к Луне.

Проблему усложняет, помимо прочего, и крайне высокая проникающая способность малоразмерных лунных пылинок. Частицы пыли были обнаружены даже во внутренних частях скафандров, внутри всех приборов лунных аппаратов. В движущихся частях аппаратуры лунная пыль приводила к интенсивному износу трущихся поверхностей и к сокращению срока службы приборов. Герметичность контейнеров для образцов, соприкасавшихся с лунной пылью, была нарушена.

Все это создает сложно решаемую проблему защиты аппаратуры, скафандров и обитаемых помещений от опасной лунной пыли.

Одним из эффективных методов предотвращения попадания пыли в обитаемые помещения лунной станции представляется создание обеспыленных площадок (космодромов) на осваиваемых территориях. Если на поверхности Луны будет устроена площадка, не содержащая пыли, то для астронавтов, прилунившихся на эту площадку, будут созданы условия с минимальными возможностями контактов с пылью.

Предлагается использовать пленочные сферические зеркала-концентраторы для фокусировки солнечного излучения на лунной поверхности [4]. В фокусе зеркала температура превысит 1500 градусов, при которой плавится лунный реголит. Если использовать зеркало диаметром 4 м, то собираемое им излучение позволит плавить 10 г реголита в секунду. На этом принципе возможно создание солнечного строительного 3D-принтера, в котором материал лунных пород будет переплавляться в монолитную структуру заданной формы. Обязательное и необходимое условие – полное расплавление реголита. В литературе встречается много публикаций с опи-

санием аналогов солнечного строительного 3D-принтера, в которых сфокусированный солнечный луч нагревает подготовленный материал и обеспечивает его спекание в прочную структуру [5, 6]. Такой вариант строительного принтера для лунных условий непригоден.

Лунный реголит, по своей природе имеющий свойства базальтов, имеет принципиально низкую теплопроводность. Слой реголита, нагреваемый лучистым притоком энергии, будет расплавляться только на поверхности, что приведет к спеканию материала, то есть к соединению частиц реголита получившимся расплавом на небольшую глубину.

На рис. 3 показан результат прогрева пучком сфокусированного солнечного света слоя имитатора лунного реголита. Слой оплавился только на поверхности, образовав пористую структуру. После того как с оплавленного образца удалили расплавившиеся частицы реголита, стало видно, что спеченный образец малоприспособен для строительства лунного космодрома. Мало того, что пористый материал сильно уступает по прочности монолитному, его неровная поверхность способна скорее накапливать в порах пыль, чем очищаться от нее.

Мы же предлагаем использовать солнечный строительный 3D-принтер, в котором производится не спекание, а плавление реголита. Для этого реголит нужно насыпать в зону плавления по мере его сплавления с подложкой. Пятно разогрева можно перемещать по строящейся поверхности, обеспечивая постепенное формирование монолитной структуры любой формы и любого размера [7]. Аналогом такого режима наплавления можно считать обычную дуговую сварку, в которой расплав сварочного электрода наплавляется на подложку в выбранной точке. Получившаяся поверхность будет слегка волнистой, но гладкой.

Космодром на Луне может иметь небольшие размеры. Режим мягкой посадки обеспечивается вертикальным спуском космического аппарата при нулевых значениях боковых скоростей и полным гашением вертикальной скорости непосредственно перед касанием поверхности. Реактивная струя из двигателей посадки будет сдувать в разные стороны накопившуюся на космодроме пыль, обеспечивая обеспыливание посадочной площадки. Точность посадки при соответствующем навигационном обеспечении может быть очень высокой. Компания SpaceX (США) отработала режим автоматического спуска первой ступени ракеты-носителя Falcon 9 на площадку диаметром 61 м [8]. Необходимую точность навигации на Луне обеспечит проведение российских миссий «Луна-25» и «Луна-26» [9], но и она может быть значитель-

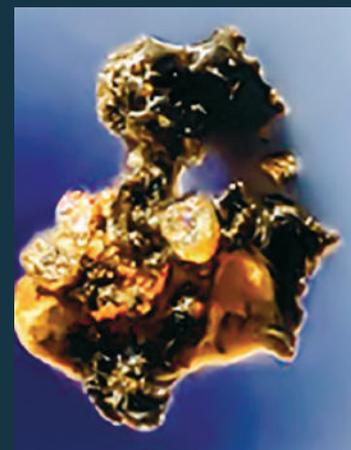
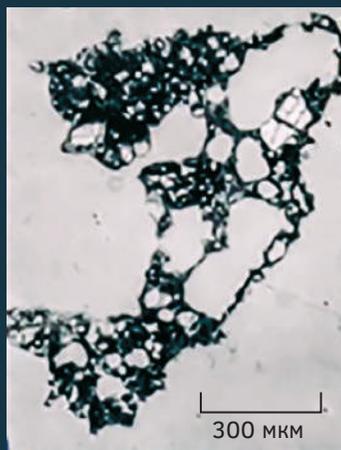


Рис. 1. Частицы лунной пыли, состоящие из агглютината – пористого стекла с вкраплениями частиц силикатной породы и железа. Справа – образец, привезенный в июле 1969 года astronautами космического корабля «Аполлон-11»



Рис. 2. Астронавт Юджин Сернан (командир корабля «Аполлон-17») в кабине посадочного модуля сразу по возвращении с прогулки по поверхности Луны. Видны пятна пыли на его теле и на нижнем белье. Декабрь 1972 г. Фото NASA

но улучшена, если лунный космодром дополнить посадочными маяками.

Анализ космических снимков лунной поверхности в местах посадок автоматической станции Surveyor 3 и пилотируемого корабля Apollo-11 показывает, что струи газов из посадочных двигателей этих аппаратов выдули лунную пыль из круга радиусом порядка 300 м [10]. Это подтверждается и прямыми оценками запыленности аппарата Surveyor 3 пылью, сдутой при посадке Apollo-11. Поэтому при посадке аппаратов в любом месте площадки 100x100 м можно не сомневаться, что посадочные двигатели полностью очистят от пыли всю площадку.

На поверхности Луны слой реголита в среднем имеет толщину от 5 до 70 см, причем рыхлым является только самый верхний слой толщиной 1-2 см, а ниже он плотный и его частицы связаны между собой диффузионной «вакуумной сваркой». Прочность поверхностного слоя реголита оказалась достаточной, чтобы посадочные лапы спускаемых аппаратов не погружались в грунт глубже, чем на несколько сантиметров. Поэтому для строительства космодрома на Луне достаточно выровнять поверхность, а сверху наплавить на нее 3D-принтером 10-сантиметровый слой переплавленного материала, уже не содержащего пылевых частиц, или создать слой спеченного грунта на выровненной поверхности и уже на него наплавить монолитный базальтовый слой [2]. За двухнедельный лунный день один солнечный 3D-принтер переработает

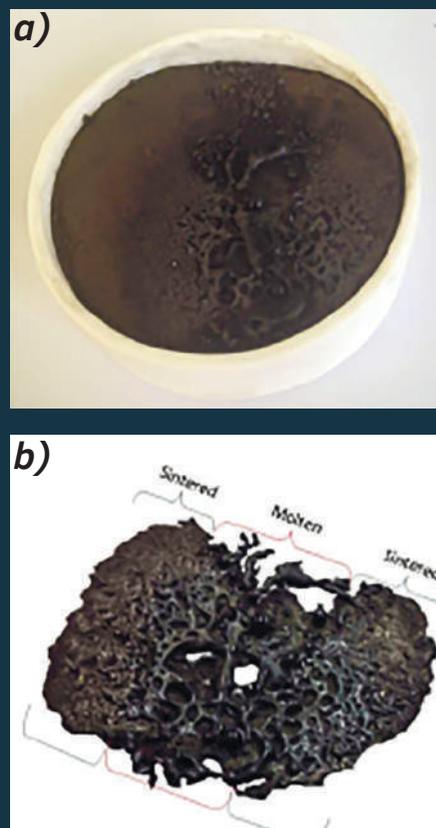


Рис. 3. Прогретый сфокусированным пучком солнечного света слой реголитовой засыпки (а) и очищенный от неспаянных частиц спеченный образец (б)

В солнечном строительном 3D-принтере производится не спекание, а плавление реголита. Аналогом такого режима нагрева можно считать обычную дуговую сварку, в которой расплав сварочного электрода наплавляется на подложку в выбранной точке.

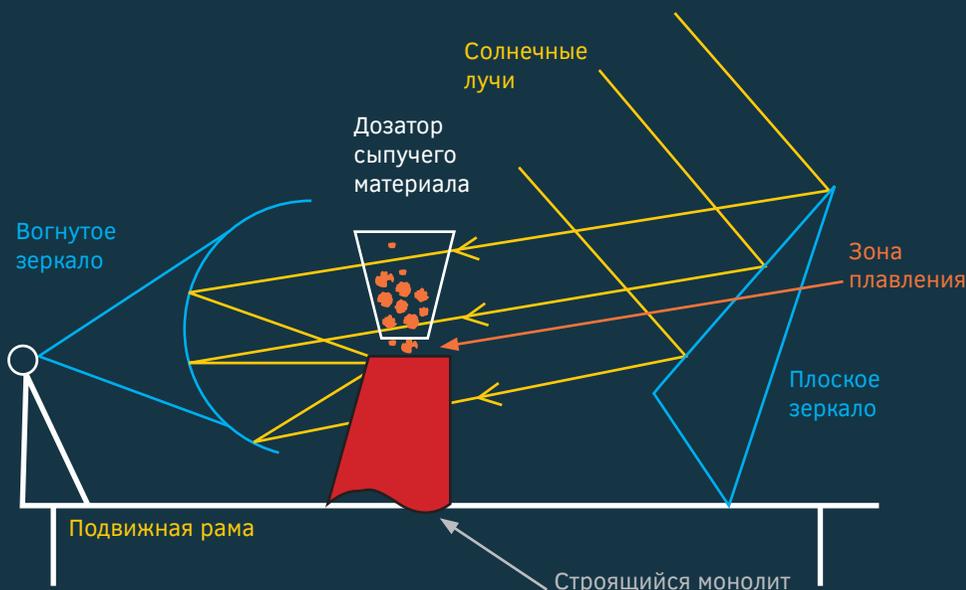


Рис. 4. Концепция строительного 3D-принтера на солнечной энергии

12 тонн реголита. Этого достаточно для формирования 50 м² прочного покрытия. При обеспечении точности навигации на поверхности Луны 10 метров [3], полноценный космодром может иметь размер 100х100 м. Такой космодром можно построить с помощью четырех 3D-принтеров за 50 месяцев, то есть еще до осуществления пилотируемой экспедиции.

Автоматический солнечный 3D-принтер с плечными зеркалами может иметь очень малую массу (не более 400–500 кг). Возможно, средства для борьбы с лунной пылью в рабочих помещениях лунной станции потребуют большей массы, чем солнечный 3D-принтер, поэтому формирование космодрома на Луне выглядит перспективным решением.



Литература

1. Кузнецов И. А., Захаров А. В., Дольников Г. Г., Ляш А. Н., Афонин В. В., Попель С. И., Шашкова И. А., Борисов Н. Д. Лунная пыль: свойства и методы исследований // Вестник «НПО имени С. А. Лавочкина». 2016. No 4. С. 20–32.
2. Сайт Astromaterials Acquisition and Curation Office (NASA, США) [Электронный ресурс]. URL: <http://curator.jsc.nasa.gov/education/LPETSS/Regolith.cfm> (Дата обращения: 15.10.2018).
3. Попель С. И., Голубь А. П., Лисин Е. А., Извекова Ю. Н., Атаманюк Б. Г., Дольников Г. Г., Захаров А. В., Зеленый Л. М. Удары высокоскоростных метеороидов и отрыв пылевых частиц от поверхности луны // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2016. Т. 103. № 9. С. 641–646.
4. Багров А. В., Нестерин И. М., Пичхадзе К. М., Сысоев В. К., Юдин А. Д. Анализ методов строительства конструкций лунных станций // Вестник «НПО имени С. А. Лавочкина». 2014. № 4. С. 75–80.
5. Багров А. В., Сысоев А. К., Сысоев В. К., Юдин А. Д. Моделирование спекания имитаторов лунного грунта солнечным излучением // Письма о материалах. 2017. Т. 7. Вып. 2. С. 130–132.
6. Meurisse A., Makaya A., Willsch C., Sperl M. (2018). Solar 3D printing of lunar regolith. *Acta Astronautica*. 152. Pp. 800–810. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.06.063
7. Багров А. В., Леонов В. А., Сысоев В. К. О возможности строительства обитаемых помещений на Луне до проведения пилотируемой миссии // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос», Звездный городок, 10–12 ноября 2015 года. Звездный городок: НИИ «ЦПК имени Ю. А. Гагарина», 2015. С. 13–14.
8. Посадочная зона 1 [Электронный ресурс]//Википедия – свободная

энциклопедия. URL: http://wikipedia.green/Посадочная_зона_1 (Дата обращения: 15.10.2018).

9. Багров А. В., Дмитриев А. О., Леонов В. А., Юдин А. Д., Москатинев И. В., Сысоев В. К. Оптическая система глобального позиционирования для Луны // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований (выпуск 2)/Сост. В. В. Ефанов. Химки: НПО им. С. А. Лавочкина, 2017. С. 86–91.
10. Кайдаш В. Г., Шкуратов Ю. Г. Нарушения структуры лунной поверхности, вызванные космическими аппаратами // *Астрономический вестник*. 2012. Том 46. № 2. С. 119–130.

References

1. Kuznecov I. A., Zaharov A. V., Dol'nikov G. G., Ljash A. N., Afonin V. V., Popel' S. I., Shashkova I. A., Borisov N. D. Lunnaja pyl': svojstva i metody issledovanij. *Vestnik «NPO imeni S. A. Lavochkina»*, 2016, no. 4, pp. 20–32.
2. Astromaterials Acquisition and Curation Office (NASA, USA). Available at: <http://curator.jsc.nasa.gov/education/LPETSS/Regolith.cfm> (Retrieval date: 15.10.2018).
3. Popel' S. I., Golub' A. P., Lysin E. A., Izvekova Ju. N., Atamanjuk B. G., Dol'nikov G. G., Zaharov A. V., Zelenyj L. M. Uдары vysokoskorostnyh meteoroidov i otrыв pylevyh chastic ot poverhnosti lunny. *Pis'ma v Zhurnal jeksperimental'noj i teoreticheskoj fiziki*, 2016, vol. 103, no. 9, pp. 641–646. DOI: 10.1134/S002136401609006X
4. Bagrov A. V., Nesterin I. M., Pichhadze K. M., Sysoev V. K., Judin A. D. Analiz metodov stroitel'sta konstrukcij lunnyh stancij. *Vestnik «NPO imeni S. A. Lavochkina»*, 2014, no. 4, pp. 75–80.
5. Bagrov A. V., Sysoev A. K., Sysoev V. K., Judin A. D. Modelirovanie spekanija imitatorov lunnogo grunta solnechnym izlucheniem. *Pis'ma o materialah*, 2017, vol. 7, iss. 2, pp.

130–132. DOI:10.22226/2410-3535-2017-2-130-132

6. Meurisse A., Makaya A., Willsch C., Sperl M. (2018). Solar 3D printing of lunar regolith. *Acta Astronautica*. 152. Pp. 800–810. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.06.063
7. Bagrov A. V., Leonov V. A., Sysoev V. K. O vozmozhnosti stroitel'stva obitaemyh pomeshhenij na Lune do provedenija pilotiruemoj missii. *Proceedings of the International XI Conference "Manned Flights to the Space"* (Zvezdnyj Gorodok, 10–12 November 2015). Zvezdnyj Gorodok, Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center, 2015, pp. 13–14.
8. Posadochnaja zona 1. Available at: http://wikipedia.green/Posadochnaja_zona_1 (Retrieval date: 15.10.2018).
9. Bagrov A. V., Dmitriev A. O., Leonov V. A., Judin A. D., Moskatinev I. V., Sysoev V. K. Op-ticheskaja sistema global'nogo pozicionirovanija dlja Lunny. Aktual'nye voprosy proektirovanija avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlja fundamental'nyh i prikladnyh nauchnyh issledovanij (iss. 2). Ed. by V. V. Efanov. *Ximki, Izdatel Lavochkin Association*, 2017, pp. 86–91.
10. Kajdash V. G., Shkuratov Ju. G. Narushenija struktury lunnnoj poverhnosti, vyzvannye kosmicheskimi apparatami. *Astronomicheskiy vestnik*, 2012, vol. 46, no. 2, pp. 119–130.

© Багров А. В., Леонов В. А., 2018

История статьи:

Поступила в редакцию: 17.10.2018
Принята к публикации: 05.11.2018

Модератор: Плетнер К. В.

Конфликт интересов: отсутствует

Для цитирования:

Багров А. В., Леонов В. А., Создание космодрома на Луне методом наплавления реголита на монолитную поверхность // *Воздушно-космическая сфера*. 2018. №4(97). С. 78–83.