# – НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН "ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ"

# ЛУННАЯ ПЫЛЬ КАК ФАКТОР РИСКА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЛУНЫ

© 2021 г. Л. М. Зелёный<sup>*a*,\*</sup>, А. В. Захаров<sup>*a*,\*\*</sup>, И. А. Кузнецов<sup>*a*,\*\*\*</sup>, А. В. Шеховцова<sup>*a*,\*\*\*</sup>

<sup>а</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*E-mail: lzelenyi@iki.rssi.ru \*\*E-mail: zakharov@iki.rssi.ru \*\*\*E-mail: kia@iki.rssi.ru \*\*\*\*E-mail: anastasi@itforb.ru

Поступила в редакцию 10.07.2021 г. После доработки 16.07.2021 г. Принята к публикации 25.07.2021 г.

В 2022 г. наша страна возвращается на Луну. Это непростая задача, связанная с различными трудностями и опасностями. Одной из них, пока наименее изученной и наиболее малопонятной, посвящена настоящая статья, подготовленная с использованием материалов доклада "Исследование Луны и планет с помощью автоматических космических аппаратов – прелюдия к освоению Луны человеком" (он был заслушан на научной сессии Общего собрания членов РАН 21 апреля 2021 г.). Поверхность Луны, как и большинства безатмосферных тел, покрыта слоем пыли – мелкой фракцией реголита, измельчённого за сотни миллионов лет пребывания на её поверхности планеты. Под воздействием внешних факторов – как естественных, так и антропогенных – частицы пыли могут подниматься с поверхности, левитировать под воздействием электростатических сил, осаждаться на космических аппаратах. Опыт шести американских пилотируемых экспедиций "Аполлон" показал, что микрочастицы лунной пыли воздействовали на служебные системы посадочных аппаратов, оседали на скафандры астронавтов, попадали в системы рециркуляции воздуха герметичных посадочных модулей и, как следствие, влияли на состояние здоровья астронавтов. Учитывая размеры таких частиц, а это могут быть десятки и сотни нанометров, становится понятным, что токсичность лунной пыли – одна из самых серьёзных проблем при исследовании Луны с участием человека. Такой вывод был сделан по завершении программы "Аполлон". Авторами статьи обсуждается фактор лунной пыли при выполнении пилотируемых экспедиций на Луну, намечаются методы решения этой проблемы.

*Ключевые слова*: пылевые частицы, реголит, пылевая плазма, экзосфера луны, токсичность лунной пыли.

DOI: 10.31857/S0869587321110141

На научной сессии Общего собрания членов РАН, посвящённой 60-летию первого полёта человека в космос, много говорилось о космических планах России, в том числе и о новой лунной программе. Россия возвращается на Луну: после запуска автоматического космического аппарата "Луна-25" последуют запуски "Луны-26", "Луны-27", "Луны-28". Но в данной статье мы сосредоточим внимание не на аспектах этой программы, а на одном из наименее исследованных препятствий на пути освоения Луны человеком — лунной пыли.

Интересно, что эта тема обсуждалась ещё за несколько лет до полётов к Луне в повести замечательного английского фантаста Артура Кларка "Лунная пыль" [1]. По её сюжету космический корабль с туристами, как в болоте, тонет в пылевом океане, но в итоге его героически спасают.

ЗЕЛЁНЫЙ Лев Матвеевич — академик РАН, научный руководитель ИКИ РАН. ЗАХАРОВ Александр Валентинович — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИКИ РАН. КУЗНЕЦОВ Илья Александрович — младший научный сотрудник ИКИ РАН. ШЕХОВЦОВА Анастасия Валерьевна — инженер ИКИ РАН, студентка Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Можно предположить, что именно с гипотетической лунной пылью связаны опасения проектантов первых советских лунных посадочных аппаратов: не нужно ли оснащать их подобием поплавков для плавучести в пылевых морях? Лискуссии по этому поводу прекратились благодаря Сергею Павловичу Королёву, взявшему на себя всю полноту ответственности за конструкторское решение. Судя по воспоминаниям очевилцев. Генеральный конструктор, взяв лист бумаги, написал на нём всего два слова – "Луна твёрдая", расписался и отдал инженерам, проектировавшим посадочные аппараты. 3 февраля 1966 г. впервые в истории была осуществлена мягкая посалка космического аппарата на Луну. Советская автоматическая станция "Луна-9" прилунилась в Океане бурь и в течение трёх дней передавала на Землю телевизионные изображения окружающего ланлшафта. К большому сожалению, Королёв не дожил всего трёх недель до этого знаменательного дня.

В 1969—1972 гг. к Луне были отправлены шесть американских экспедиций в рамках пилотируемой программы "Аполлон". Казалось бы, уже тогда можно было понять особенности воздействия лунной пыли на технику и человека, тем не менее главные проблемы остались нерешёнными.

Учитывая перспективные планы отечественных пилотируемых полётов на Луну, попытаемся обсудить роль одного из негативных факторов, воздействующих на человека на её поверхности. Основные из них хорошо известны, в определённой степени уже исследованы, в том числе вакуум, радиационное облучение, пониженная гравитация, отсутствие магнитного поля, большие градиенты температур и ряд других. Однако довольно обширный опыт работы астронавтов на поверхности Луны по программе "Аполлон" показал, что ещё одной серьёзной опасностью, с которой они неожиданно столкнулись, оказалась лунная пыль. Степень её воздействия на человека, системы жизнеобеспечения и служебные системы посадочных аппаратов привела командира миссии "Аполлона-17" Юджина Сернана к выводу: "Я думаю, что пыль, вероятно, является одним из наших главных препятствий для нормальной работы на Луне. Я думаю, что мы можем преодолеть все остальные физиологические, физические или механические проблемы, кроме пыли" [2]. А участник той же экспедиции Харрисон Шмитт в отчёте написал: "Одним из наиболее надоедливых и препятствующих исследованию лунной поверхности аспектов является пыль: её прилипчивость ко всему, независимо от материала, будь то кожа, костюм, металл, неважно, какой он, и эффект, похожий на трение, который ограничивает действие всего, на что она попадает" [3].

Впервые столкнулись с этой проблемой участники первых лунных экспедиций – "Аполлон-11", "Аполлон-12". При подготовке следующих миссий предпринимались попытки учесть приобретённый опыт, но большинство трудностей, связанных с влиянием лунной пыли, несмотря на внимание специалистов, так и остались непреодолёнными [2]. В числе приоритетных направлений исследований в этой области были и остаются следующие: изучение лунной пыли, её динамики в приповерхностной лунной экзосфере; степень влияния на здоровье человека и инженерные системы космических аппаратов; развитие методов минимизации такого влияния.

Имеющиеся данные о лунной пыли основаны на анализе образцов реголита, доставленных на Землю американскими астронавтами в рамках программы "Аполлон" и автоматическими станциями "Луна-16", "Луна-20" и "Луна-24", на результатах эксперимента Lunar Ejecta and Meteorite (LEAM) [4], а также многочисленных лабораторных экспериментах, теоретических и численных исследованиях, выполненных за последние десятилетия [см. например, 5-11]. Обзор этих исследований содержится в работе [12]. Возможные методы минимизации влияния лунной пыли на человека и технические системы представлены в обзоре [13]. В нашей статье мы попытаемся проанализировать проблемы, связанные с токсичностью лунной пыли (термин "токсичность" используется в данном случае не только как свойство лунной пыли в биомедицинском применении, но и в более широком значении её негативного воздействия на деятельность астронавтов и инженерные системы посадочных аппаратов).

### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛУННОЙ ПЫЛИ

Реголит (поверхностный слой лунного грунта) сформировался в результате ударного метаморфизма, большая его часть представляет собой мелкие и неконсолидированные обломки подстилающих кристаллических горных пород, покрывающих всю лунную поверхность. Толщина слоя составляет обычно от 4 до 5 м в области лунных морей и от 10 до 15 м в гористых районах [14, 15]. Частицы размера менее 1 мм составляют более 95% массы реголита. Наиболее мелкий его компонент (менее 100 мкм) определяется как лунная пыль. Средний размер частиц варьирует от 40 до 100 мкм. Такие частицы составляют порядка половины веса лунного реголита, при этом большая его часть имеет размеры от 45 до 80 мкм [14, 16].

Данные о распределении микрочастиц по размерам имеют важное значение для исследований условий отрыва частиц от поверхности и их даль-



Рис. 1. Примеры распределения пылевых частиц по размерам для разных образцов, доставленных на Землю и полученных различными методами

а – гистограмма распределения по размерам частиц реголита для образца 24176, доставленного "Луной-24" (по оси ординат – процент массы исследуемых частиц, по оси абсцисс – размер гранул в мкм [18]); б – распределение частиц реголита по размерам (по данным исследований образцов реголита, доставленных на Землю экспедицией "Аполлон" [19])

нейшей динамики, токсикологических эффектов влияния пыли на функции дыхания человека, проектирования эффективных систем фильтрации воздушной среды обитания человека [17]. Примеры распределения размеров пылевых частиц представлены на рисунке 1 [18, 19].

Верхний слой реголита (несколько миллиметров) представляет собой чрезвычайно пористую (>80%) структуру [20]. С глубиной плотность его увеличивается, и инфракрасные измерения показывают, что характеристики верхних примерно 10 см реголита приблизительно одинаковые по всей поверхности Луны, за исключением недавно сформированных ударных кратеров [21]. Объёмная плотность реголита по данным "Луны-20" составляет около от 1.04 до 1.80 г · см<sup>-3</sup> для различных образцов [22, 23]. Образцы, полученные по программе "Аполлон", указывают на различную плотность реголита, вплоть до 1.9 г · см<sup>-3</sup> [24, 25].

Форма пылевых частиц, как правило, крайне нерегулярная, с ярко выраженными заострёнными краями, что очень отличает их от земных аналогов. Плотность отдельных частиц составляет  $2.7-3.0 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  [25]. Все пылевые частицы могут быть морфологически классифицированы на четыре типа: сферические, блоки неправильной формы с острыми углами, осколки (чешуйки) стекла, нерегулярные (пористые, "швейцарский сыр"), причём исследователями подчёркивается, что частицы нерегулярной формы, как правило, имеют заострённые углы [17]. Форма частиц в основном продолговатая, что приводит к преимущественному слипанию отдельных из них вдоль их продольных осей. Следствием такой особенности тонкой фракции реголита становится анизотропия физических свойств [26]. На рисунке 2 представлен типичный образец агглютината пористое стекло с вплавленными частицами породы и железа и частица с порами, образованными в результате выхода летучих компонентов при формировании в результате плавления [27].

Лунная порода обычно состоит из пироксена, плагиоклаза, ильменита, оливина с небольшим содержанием множества других минералов [28]. Химический анализ лунной пыли показывает, что с уменьшением размера частиц уменьшается доля чётко определённых минералов, но увеличивается доля стеклообразного материала. Общий химический состав лунной пыли изменяется по всей лунной поверхности, но составляет около 50% SiO<sub>2</sub>, 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10% CaO, 10% MgO, 5% TiO<sub>2</sub> и 5-15% Fe [29]. Ключевая особенность лунного реголита и лунной пыли состоит в присутствии большего, чем ожидалось, количества нанофазного металлического железа (npF<sup>0</sup>). Именно по этой особенности легко отличить лунные породы от их земных аналогов. Появление нанофазного металлического железа - следствие постоянного воздействия солнечного ветра и высокоэнергичных частиц солнечного и космического происхождения [30]. Размеры частиш нанофазного железа в агглютинатах колеблются в широком диапазоне \_ ОТ нескольких нанометров ло нескольких сотен нанометров. Число нанофазных частиц в образце лунного грунта измеряется методом ферромагнитного резонанса и обозначается как Is. Отношение нанофазного железа к общему содержанию железа FeO, то есть Is/FeO,



Рис. 2. Фотографии двух частиц лунного реголита

*a* — пористое стекло с вкраплениями частиц реголита и железа; *б* — частица с порами, образованными в результате выхода летучих компонентов при формировании в результате плавления [27]

служит индексом зрелости лунной почвы [31], он используется при оценке рисков для здоровья от воздействия лунной пыли: чем выше Is/FeO, тем выше риск [32]. Значение Is/FeO заметно увеличивается с уменьшением размеров пылевых частиц, что характерно для зрелых почв [32, 33].

Электрические свойства пылевых частиц и основной части силикатов лунного реголита характеризуются чрезвычайно низкой электрической проводимостью — порядка  $10^{-14}$  См/м (для реголита) и  $10^{-9}$  См/м (для лунной породы) при нулевой освещённости [25, 34]. С повышением температуры электропроводность реголита и породы возрастает и при солнечном ультрафиолете увеличивается приблизительно в  $10^6$  раз.

Относительная диэлектрическая проницаемость определяется плотностью реголита  $\rho$ , составляет приблизительно 1.9<sup> $\rho$ </sup>, где  $\rho$  в г/см<sup>3</sup> [25] и зависит от минералогического состава реголита. Чрезвычайно низкая электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость реголита указывают на то, что он слабо поглощает электромагнитную энергию и характеризуется достаточно эффективной фотоэмиссией.

В некоторых полярных областях Луны под её поверхностью регистрируется водород с концентрацией, соответствующей расчётному содержанию водяного льда от 0.5 до 4.0% по массе в зависимости от глубины. Эти данные были получены по результатам измерений потоков нейтронов от поверхности Луны российским прибором LEND на борту американской автоматической станции "Lunar Reconnaissance Orbiter" [35].

## ОПЫТ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ "АПОЛЛОН" (1969–1972)

Воздействие лунной пыли оказалось наиболее неожиданным и наиболее неприятным эффектом, с которым столкнулись американские астронавты. Это было отмечено в их отчётах и многочисленных научных публикациях, в которых обсуждалось влияние лунной пыли на системы и оборудование посадочных аппаратов, на условия пребывания и деятельность человека на поверхности Луны [2, 36–41].

Токсичность лунной пыли следует рассматривать не только как следствие природных эффектов подъёма и левитации пылевых частиц под воздействием внешних природных факторов на реголит, но и антропогенного воздействия на приповерхностную среду, что показал опыт выполнения программы "Аполлон" (ещё раз подчеркнём, что термин "токсичность" здесь используется не только в биомедицинском смысле, но и в более широком значении — он подразумевает также негативное воздействие лунной пыли на деятельность астронавтов и инженерные системы посадочных аппаратов).

Антропогенные факторы. Подъём пыли с поверхности происходит вследствие работы реактивных двигателей при посадке и взлёте посадоч-

2021

ных аппаратов, действии механических систем, например бурильной установки, на поверхности Луны, активности астронавтов, передвижении их по поверхности [2]. Кроме того, посадочный аппарат и астронавт на лунной поверхности вызывают возмущение в системе естественно сформировавшихся электростатических полей, которым подчиняется динамика заряженных пылевых частиц, что также меняет картину [40]. Изменение естественной динамики частиц, левитирующих над поверхностью реголита, усиливает их влияние на системы посадочного аппарата, деятельность человека и его здоровье.

Систематизация эффектов лунной пыли. Обнаруженные при реализации программы "Аполлон" эффекты влияния лунной пыли были систематизированы по девяти категориям:

• ухудшение видимости при поднятии пыли,

• ложные показания приборов,

 осаждение пыли и загрязнение поверхностей,

• потеря сцепления с грунтом при движении по поверхности,

• заклинивание вращающихся узлов механизмов,

• активная эрозия поверхностей,

• проблемы с системой терморегулирования,

• нарушение уплотнений и герметичности систем,

 проблемы с дыханием и другие факторы, связанные со здоровьем человека [2].

Влияние пыли на оптические поверхности исследовалось на протяжении нескольких последних десятилетий. Такая длительность стала возможной благодаря тому, что на поверхности Луны были развернуты отражательные системы лазерной локации (лазерные отражатели имелись на "Луноходе-2" [42], при выполнении программы "Аполлон" астронавты развернули системы аналогичного назначения [38]). После взлёта посадочного аппарата с поверхности Луны и в первые несколько месяцев наблюдений сигнал от лазерных отражателей, установленных участниками экспедиции "Аполлон-14", не испытывал существенной деградации. Однако спустя почти 40 лет работы отражателей он стал слабее в 10 раз [38]. Сигнал от лазерных отражателей "Лунохода-2" в начале их работы был на порядок выше, чем от отражателей "Аполлона-14", но через 40 лет его величина оказалась на порядок ниже, чем от тех, которые были установлены астронавтами "Аполлона-14". Такой эффект может быть связан с конструктивными особенностями уголковых отражателей и с осаждением пыли, понижающей отражательную способность. Кроме того, открытая оптика беззащитна перед частицами, участвующими в микрометеоритной бомбардировке. Во всяком случае анализ работы этих систем показал, что они достаточно успешно выполняли свои функции, однако на временном масштабе порядка десятилетия фиксировалась постепенная деградация оптики [38].

Лунная пыль оказалась крайне абразивной. Астронавты отмечали, что после работы вне посадочного модуля циферблаты приборов и солнцезащитные козырьки их шлемов были настолько исцарапаны, что не удавалось прочитать показания. После 8 часов работы, особенно при бурении грунта, на скафандрах и перчатках фиксировались значительные потёртости и, если бы возникла необходимость выполнить один или два дополнительных выхода из посадочного модуля, они могли бы потерять герметичность [2]. Например, проверенный на герметичность скафандр Пита Конрада, командира миссии "Аполлон-12" уже после первого выхода из посадочного модуля начал терять давление со скоростью ~ 0.01 атм/мин после первого, а после второго выхода ~ 0.017 атм/мин. Так как безопасная утечка составляла 0.02 атм/мин, сомнительной оказалась бы безопасность третьего выхода, если бы он был запланирован. К тому же пыль, проникшая в подвижные узлы скафандра, в такой степени затруднила движения астронавта, что ешё один выход из посадочного модуля ему уже был не под силу. Застёжками-молния на скафандрах после работы вне посадочного модуля было невозможно пользоваться. Из-за воздействия пыли герметичность всех запечатанных образцов лунной атмосферы, доставленных на Землю, была нарушена и они оказались бесполезными для анализа. Отмечалось, что при длительном пребывании на Луне для поддержания безопасных условий среды обитания следует уделять больше внимания способам обеспечения герметичности аппарата, скафандров, созданию пыленепроницаемых уплотнений.

Осаждение пыли на поверхности. В ходе лунных экспедиций было обнаружено, что пыль быстро покрывает все поверхности, с которыми контактирует, включая скафандры, обувь, ручной инструмент, оборудование и системы спускаемого аппарата. Очистка от неё потребовала от астронавтов дополнительных усилий, но они оказались неэффективными [2]. Следует, однако, отметить, что миссией "Аполлон-14" был поставлен эксперимент TDS (Thermal Degradation Sample) для изучения поглощающей и излучающей способности различных поверхностей при осаждении на них пыли. Две идентичные панели. содержавшие по 12 образцов поверхности с различными свойствами, астронавты покрыли пылью в лунной среде, а затем возвратили на Землю. Адгезия пыли к образцам оказалась ниже, чем ожидалось [43]. Вместе с тем по результатам обследования скафандров было выявлено значительное загрязнение их внешней поверхности -



**Рис. 3.** Распределение частиц пыли, собранных со скафандра астронавта после возвращения на Землю, по размерам [37]

*N*-количество исследованных частиц

до 2.5  $10^5$  частиц пыли на квадратный сантиметр [37]. Распределение частиц по размерам по результатам обследования скафандра представлено на рисунке 3.

Заклинивание движущихся узлов. Осаждение пыли приводило к таким неприятным эффектам, как заклинивание движущихся узлов. Такие сообщения от астронавтов поступали в ходе каждой экспедиции посещения поверхности Луны.

Проблемы с системами терморегулирования. Серьёзные проблемы вызывал слой пыли на поверхности радиатора системы терморегулирования. Попытки удалить эту пыль в лунных условиях эффекта не дали, что противоречило результатам наземных испытаний и эксперимента TDS. Из-за слоя пыли рабочая температура некоторых систем аппаратов "Аполлон-16" и "Аполлон-17" превысила ожидаемую на 20°С, в связи с чем ухудшились характеристики отдельных приборов. Именно из-за этого факта Джон Янг, командир экспедиции "Аполлон-16", заметил, что "пыль – проблема номер один при возвращении на Луну" [2].

Влияние на здоровье человека. Опыт программы "Аполлон" показал, что самый неприятный фактор лунной пыли — её влияние на здоровье человека, прежде всего при попадании на кожу, в глаза, при её вдыхании. Экипажи сообщали, что лунная пыль характеризуется резким запахом, напоминающим порох, что, видимо, является следствием присутствия летучих веществ на поверхности пылевых частиц. Пыль проникала сквозь одежду, сняв её, астронавты обнаруживали, что покрыты пылью. Попав в лунный модуль, в условиях отсутствия гравитации во время полёта к Земле пыль распространялась по объёму космического аппарата. Экипаж дышал этим загрязнённым воздухом, пыль раздражала глаза [2]. Имевшиеся на борту средства очистки от пыли не справлялись с задачей. При подготовке более поздних миссий "Аполлон" это свойство лунной пыли было учтено, приняты меры, несколько уменьшившие её влияние. Тем не менее токсичность микронных и субмикронных частиц, обнаруженных на скафандрах, указывает на необходимость постоянного контроля концентрации частиц внутри посадочного модуля, а в будущем – в долгосрочной среде обитания [37].

При рассмотрении влияния пыли на человеческий организм исследователями отмечается, что её микрочастицы, особенно размера менее 100 нм, могут нанести вред в первую очередь лёгким, сердечно-сосудистой системе, зрению, повредить кожный покров [37]. Если принять в расчёт абразивность субмикронных частиц пыли (их размеры могут быть на порядки меньше размера клеток), становится очевидным вероятный вред такой пыли при попадании в организм человека.

Опыт реализации программы "Аполлон" показал, что при её подготовке серьёзность проблемы влияния пыли недооценивалась [2]. Был сделан вывод, что динамика пыли, связанная с деятельностью человека на поверхности, оказалась значительна и может быть на порядки выше, чем динамика пылевых частиц в результате естественных природных процессов [36].

Свойство лунной пыли проникать сквозь уплотнения герметичных систем и прилипать к различным поверхностям можно рассматривать с точки зрения динамических свойств левитирующих над поверхностью субмикронных и микронных частиц этой пыли. При взаимодействии с поверхностью они проявляют себя не просто как "ударники". Левитируя, микрочастицы могут быстро вращаться, при этом скорость их собственного вращения на освещённой стороне Луны может составлять от нескольких тысяч до миллионов оборотов в секунду [44]. Учитывая ударное происхождение таких частиц, необходимо иметь в виду, что их формы крайне нерегулярны и часто заострены [45]. Подобные быстро вращающиеся частицы могут обладать большой поражающей силой (что напоминает восточные метательные звёздочки "сюрикэн"). Видимо, именно эта особенность лунной пыли в сочетании с электростатическим зарядом объясняет её удивительную способность агрессивно воздействовать на поверхности чувствительных систем приборов и посадочных аппаратов, проникать сквозь герметические уплотнители.

# ПРОГРАММА ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С ЛУННОЙ ПЫЛЬЮ

Опыт выполнения и анализ результатов программы "Аполлон" показал, что новый этап освоения Луны с участием человека потребует дополнительных исследований с целью более глубокого понимания плазменно-пылевых процессов в её приповерхностной экзосфере, детального изучения характеристик реголита, свойств пылевых частиц с учётом их размерности. Это знание чрезвычайно важно для выработки рекомендаций по снижению влияния лунной пыли на инженерные системы и человека.

Исследования физических процессов, связанных с динамикой лунной пыли, предполагается проводить по меньшей мере в трёх направлениях. Первое из них — изучение динамики лунной пыли *in situ* с помощью приборов, установленных на лунных посадочных аппаратах. Второе направление — лабораторные исследования. Третье — теоретические исследования и численное моделирование. Получаемые результаты необходимо использовать при разработке методов минимизации воздействия лунной пыли. Предложения по каждому из упомянутых направлений исследований изложены ниже.

Исследования динамики лунной пыли in situ. К настоящему времени сформирована программа исследований Луны, вошедшая в Федеральную космическую программу на ближайшие годы и предусматривающая посадочные и орбитальные экспедиции с использованием автоматических аппаратов [46]. Предполагается, что каждый из них будет иметь на своём борту научный прибор для изучения динамики пыли и приповерхностной плазменно-пылевой экзосферы. Заметим, что планируемые исследования плазменно-пылевых процессов у поверхности Луны станут первыми после единственного пылевого эксперимента, проведённого экипажем экспедиции "Аполлон-17" в 1972 г.

Комплекс научной аппаратуры посадочного аппарата "Луна-25" включает прибор пылевого мониторинга Луны (ПмЛ). Он способен регистрировать левитирующие у посадочного аппарата пылевые частицы, определять их основные характеристики (скорость, заряд, механический импульс, массу регистрируемой частицы), а также основные параметры плазменного окружения (плотность плазмы, температуру, потенциал) и приповерхностного электрического поля [47].

На посадочном аппарате "Луна-27" предполагается установить усовершенствованную версию ПмЛ – прибор для исследований динамики пыли (ПмЛ-ЛР). Его основные чувствительные элементы будут установлены на выносной штанге, которая позволит уменьшить влияние посадочного аппарата на показания датчиков, разместить их ближе к поверхности.

В ходе исследований пылевой составляющей космической плазмы на орбитах Луны в 2013—2014 гг. обнаружено, что на высотах от несколь-

ких километров до 250 км, где проводились измерения, существует пылевое облако, характеристики которого зависят от местного времени, высоты [48]. Было сделано заключение, что облако состоит из вторичных частиц, образовавшихся в результате бомбардировки поверхности Луны микрометеоритами, а также, возможно, пылевых частиц, возникших в результате воздействия на реголит УФ-излучения Солнца и солнечного ветра. Следствие этих воздействий - электростатическая левитация пылевых частиц (хотя прямых доказательств левитации частиц на таких высотах пока не получено). Данные исследования были проведены прибором Lunar Dust Experiment (LDEX), установленным на борту орбитального аппарата HACA "Lunar Atmosphere and Dust Experiment Explorer" (LADEE) [48]. На орбитальном аппарате "Луна-26" предлагается установить прибор для исследований такого пылевого облака, что позволит более детально представить распространение пылевых частиц на орбитах Луны.

Приборы для изучения плазменно-пылевых процессов у поверхности Луны планируется установить на следующих автоматических аппаратах, оснащённых луноходом и возможностью доставки образцов реголита на Землю. Такие исследования предусмотрены Федеральной космической программой.

Лабораторные исследования и моделирование плазменно-пылевых процессов. Помимо наблюдения динамики пыли у поверхности Луны *in situ* планируется выполнить программу лабораторного моделирования плазменно-пылевых процессов в условиях, близких к лунным. Для этого важно решить две ключевые задачи: создать лабораторную установку, имитирующую условия, близкие к естественным в приповерхностной области Луны, и создать аналоги реголита по своим параметрам близкие к тем, которые характеризуют лунную пыль.

Основой лабораторной установки должна стать вакуумная камера, оснащённая инжектором пылевых частиц и средствами их активации (эксимерные лампы УФ-излучения, источники заряженных частиц, лазерное излучение). Кроме того, для регистрации и диагностики физических процессов в вакуумной камере необходима высокоскоростная стереоскопическая оптическая система. Средствами лабораторного моделирования могут быть воспроизведены и изучены условия, свойственные лунной среде. Они, в частности, включают межпланетную плазму в условиях различного уровня солнечной активности, пересечение Луной удалённого структурированного геомагнитного хвоста, зону лунного терминатора, при котором кардинально меняются условия взаимодействия межпланетной плазмы и УФ-излучения Солнца с реголитом, особенности

Категория	Характеристики аналога
Основной	Соответствует усреднённым характе- ристикам реголита. Может неточно воспроизводить химические, минера- логические или физико-механиче- ские свойства
Стандартный	Измельчённый анортозит (для лун- ных материков) или базальт (для лунных морей) с дополнительными компонентами или без них, измель- чённый до гранулометрического состава, подобного лунному
Улучшенный	Материал, соответствующий "стан- дартному", с добавлением синтетиче- ских агглютинатов (не только стекла)
Специфический	Включает аналоги пыли и аналоги, которые воспроизводят такие свой- ства, как летучие вещества, нано- фазное железо и т.д.

Таблица 1. Характеристики аналогов лунного реголита

ночной стороны Луны и плазменных процессов на освещённой стороне Луны с учётом рельефа.

Аналоги лунного грунта. В числе важных составляющих лабораторного моделирования — использование аналогов реголита, характеристики которых соответствуют специфическим параметрам лунной пыли. Чтобы аналог соответствовал моделируемому грунту, необходимо задать условия, при соблюдении которых его можно считать аналогичным. Среди таких условий наиболее часто рассматриваются аналоги по химическому, минералогическому, гранулометрическому составу, по специфическим особенностям пылевых частиц, например, их крайне нерегулярной форме, учёту содержания на поверхности пылинок нанофазного железа и других аспектов.

В составе преобладающей массы частиц реголита присутствуют плагиоклазы, пироксены, вулканическое стекло, пирокластические отложения. Они формируются в процессе спекания незатвердевших частиц, образующихся при высокоскоростном импактном воздействии микрометеоритов на реголит, а также вследствие их вторичного разогревания и переплавления [14]. Как уже упоминалось, частицы лунной пыли характеризуются присутствием нанофазного железа. Другой важный параметр, который необходимо учесть при создании аналога реголита, – размеры частиц и их соответствие гранулометрическому распределению в естественных образцах. Необходимо иметь в виду и специфические формы пылевых частиц, сформированных в результате высокоскоростных ударных процессов. На их острых сколах, заострённых краях в естественных условиях может появляться избыточный электростатический заряд, придающий частицам специфические свойства. Приближение к таким свойствам достигается в мельницах, где частицы разрушаются по слабым связям исходного материала. Существующие количественные метолы оценки формы пылевых частиц основаны на использовании двух параметров: соотношение сторон (aspect ratio, AR) и коэффициента Heywood (HF). Каждый из этих параметров может иметь значения от 0 до 1. Чем округлее частица, тем ближе значения обоих параметров к 1 (идеальный круг). АR характеризует удлинение частицы и определяется как отношение минимального ортогонального диаметра к максимальному. HF описывает сложность формы частицы путём сравнения периметра частицы с периметром круга с той же площадью поверхности [49].

Имеющиеся аналоги лунного реголита для лунных морей и материков, разработанные в основном в США и Китае, подразделяются на четыре категории: основной, стандартный, улучшенный и специфический. Их характеристики представлены в таблице 1.

Созданию аналогов лунного реголита и его составляющей – лунной пыли – в настоящее время уделяется большое внимание. Архив существующих аналогов лунного реголита Planetary Simulant Database [50] по состоянию на 31.03.2021 включает 43 зарегистрированных наименования аналогов, созданных в США, Китае, странах Евросоюза, Японии, Канаде, Германии, Великобритании, Корее, Австралии. Из них только три аналога предназначены для целенаправленного изучения пыли: "OPRFLCROSS1 Lunar Ice Simulant" компании "Off Planet Research" (США), "Beijing Highlands Lunar Dust (BHLD20)" и "China Lunar Dust Simulant CLDS" (КНР) – два последних использовались при подготовке миссии "Chang'E-5". Недавно был представлен вариант аналога лунного реголита, созданного в нашей стране [51].

Теоретические исследования и численное моделирование. Это направление в последние десятилетия было основным при изучении динамики луной пыли. Однако до сих пор остаются без ответа несколько ключевых вопросов: объяснение приобретения заряда поверхностью Луны, достаточного для отрыва частиц от поверхности; учёт адгезивных сил Ван дер Вальса, удерживающих пылевые частицы на поверхности; выяснение особенностей распределения плазмы и динамики пылевых частиц на границах света и тени в области лунного терминатора; объяснение специфических особенностей рельефа Луны (например, присутствие кратеров, крупных камней).

Методы минимизации воздействия лунной пыли. Со времени обнаружения негативного влияния лунной пыли на инженерные системы посадочных аппаратов и человека начали разрабатываться методы уменьшения такого влияния. Динамика пыли рассматривалась как результат природных процессов, а также антропогенных процессов, связанных с деятельностью человека. Естественные физические процессы, приводящие к перемещению пыли, включают, как уже упоминалось, выбивание с поверхности Луны пылевых частиц в результате высокоскоростных ударов микрометеоритов, а также электростатическую левитацию пылевых частиц над поверхностью Луны в результате воздействия на реголит потока межпланетной плазмы и УФ-излучения Солнца. Что касается антропогенных процессов, то они сводятся к динамике пыли, вызванной посадкой космических аппаратов и их взлётом, движением роверов и астронавтов, работами, связанными с бурением, сбором образцов реголита, строительством и другими факторами, подразумевающими взаимодействие с реголитом [13].

Методы уменьшения влияния лунной пыли на инженерные системы посадочных аппаратов и человека сводятся к трём [13, 52]. Системный подход подразумевает проектирование посадочных средств, формирование программы деятельности человека на поверхности с учётом пылевого фактора. Пассивные технологии включают различные способы модификации поверхности и использования простых инструментов. Активные технологии подразумевают создание вблизи защищаемых поверхностей специальных систем, которые создают электростатические поля, способные отклонять подлетающие к ним заряженные пылевые частицы, либо сбрасывать уже осевшие на поверхность частицы. Такие системы защиты обычно требуют энергопотребления [32].

Разработка методов минимизации влияния пылевых частиц на инженерные системы и человека требует детальных лабораторных исследований с использованием аналогов лунной пыли и образцов материалов и поверхностей, используемых при проектировании посадочных аппаратов и верхней одежды космонавтов.

\* \* \*

В настоящее время как в России, так и в других странах, по-видимому, не существует крупномасштабных установок, имитирующих весь спектр возможных плазменно-пылевых процессов, характерных для приповерхностной экзосферы Луны. Однако в нашей стране (как и в ряде других стран) уже созданы и действуют небольшие лабораторные установки на основе вакуумных камер с системами активации микрочастиц и видеорегистрации их динамики. Они действуют, в частности, в Институте космических исследований РАН, Объединённом институте высоких температур РАН, Институте прикладной физики РАН. Здесь могут выполняться научные исследования по решению части указанных выше проблем и есть специалисты, знакомые с такими проблемами. Однако, по нашему мнению, целенаправленные исследования должны выполняться в соответствии со специализированной научно-технической программой. Она может быть подготовлена совместно головными научно-исследовательскими организациями госкорпорации "Роскосмос" и Российской академии наук.

Реализация программы потребует модернизации и развития существующего лабораторного вакуумного оборудования, оснащения установок современными системами активации пылевых частиц и средствами регистрации физических параметров. Важным направлением лабораторных исследований должно стать создание аналогов лунного реголита. Комплексные исследования влияния микрочастиц лунной пыли (или её аналогов) на системы, оборудование и приборы пилотируемых посадочных аппаратов будут способствовать успешному проведению исследований Луны и минимизации токсичного влияния лунной пыли на человека.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Кларк А. Лунная пыль. М.: Знание, 1965.
- Gaier J.R. The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions // NASA/TM-2005-213610. 2005.
- Winterhalter D. et al. Lunar Dust and Its Impact on Human Exploration: A NASA Engineering and Safety Center (NESC) Workshop // NASA/TM-2020-5008219/NESC-RP-19-01469. 2020.
- Berg O.E., Wolf H., Rhee J. Lunar soil movement registered by the Apollo 17 cosmic dust experiment // Interplanetary Dust and Zodiacal Light, Proceedings of IAU Colloq. 31. 1976. P. 233–237. https://doi.org/10.1007/3-540-07615-8 486
- Nitter T., Havnes O., Melandso F. Levitation and dynamics of charged dust in the photoelectron sheath above surfaces in space // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103 (A4). P. 6605–6620. https://doi.org/10.1029/97JA03523
- Sickafoose A.A., Colwell J.E., Horanyi M., Robertson S. Experimental levitation of dust grains in a plasma sheath // Journal of Geophysical Research. 2002. V. 107 (A11). P. 1408. https://doi.org/10.1029/2002JA009347
- Poppe A., Horanyi M. Simulations of the photoelectron sheath and dust levitation on the lunar surface // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115 (A08106). P. 1–9.

https://doi.org/10.1029/2010JA015286

ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК том 91 № 11 2021

- Wang X., Horanyi M., Robertson S. Experiments on dust transport in plasma to investigate the origin of the lunar horizon glow // Journal of Geophysical Research. 2009. V. 114 (A05103). https://doi.org/10.1029/2008JA013983
- Mishra S.K., Bhardwaj A. Photoelectron Sheath on Lunar Sunlit Regolith and Dust Levitation // The Astrophysical Journal. 2019. V. 884:5. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab3e08
- Popel S.I., Zelenyi L.M. Dusty plasmas over the Moon // Journal of Plasma Physics. 2014. V. 80 (6). P. 885–893. https://doi.org/10.1017/S0022377814000828
- 11. Popel S.I., Zelenyi L.M., Golub' A.P., Dubinskii A.Yu. Lunar dust and dusty plasmas: Resent development, advances, and unsolved problems // Planetary and Space Science. 2018. V. 156. P. 71–84. https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.02.010
- 12. Захаров А.В., Зелёный Л.М., Попель С.И. Лунная пыль: Свойства, потенциальная опасность // Астрономический вестник. 2020. № 6. С. 483–507.
- Afshar-Mohajer N. et al. Review of dust transport and mitigation technologies in Lunar and Martian atmospheres // Advances in Space Research. 2015. V. 56. P. 1222–1241.
- McKay D.S. et al. The Lunar Regolith // The Lunar Sourcebook / Eds. Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. N.-Y.: Cambridge University Press, 1991. P. 285–356.
- 15. Fa W., Liu T., Xie M., Du J. Regolith thickness over the Apollo landing sites from morphology of small fresh impact craters // 50th Lunar and Planetary Science Conference (LPI Contrib. No. 2132). 2019. № 1765.
- Carrier W.D. III Lunar regolith grain size distribution // Moon. 1973. V. 6. P. 250–263.
- 17. Park J.S., Liu Y., Kihm K.D., Taylor L.A. Micro-morphology and toxicological effect of lunar dust // The 37th Lunar and Planetary Science Conference. 2006. XXXVII. № 2193.
- 18. *Родэ О.Д., Иванов А.В.* Распределение частиц по размерам образцов реголита "Луны-24" // Астрономический вестник. 1984. № 18. С. 1–3.
- Liu Y., Taylor L.A. Characterization of lunar dust and a synopsis of available lunar stimulants // Planetary and Space Sciences. 2011. V. 59. P. 1769–1783. https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.11.007
- Hapke B., Sato H. The porosity of the upper lunar regolith // Icarus. 2016. V. 273. P. 75–83. ISSN 0019-1035. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.10.031
- Hayne P.O. et al. Global regolith thermophysical properties of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer Experiment // Journal of Geophysical Research: Planets. 2017. V. 122. P. 2371–2400. https://doi.org/10.1002/2017JE005387
- 22. *Leonovich A.K. et al.* Physical and mechanical properties of Lunar soil sample in nitrogen medium: research results, in Lunnyi grunt iz Morya Izobiliya (Lunar Soil from Mare Fecunditatis) / Ed. Vinogradov A.P. Moscow: Nauka, 1974. P. 563–570.
- Slyuta E.N. Physical and mechanical properties of the Lunar soil (a review) // Solar System Research. 2014.
  V. 48. P. 330–353. https://doi.org/10.1134/S0038094614050050

- Papike J.J., Simon S.B., Laul J.C. The Lunar Regolith' Chemistry, Mineralogy, and Petrology // Rev. of Geophys and Space Physics. 1982. V. 20 (4). P. 761–826.
- Carrier W.D. III, Olhoeft G.R., Mendell W. Physical properties of Lunar surface // The Lunar Sourcebook / Eds Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 475–594.
- Mahmood A., Mitchell J.K., Carrier W.D. III. Grain orientation in lunar soil // Proceedings of the 5th Lunar Science Conference. 1974. P. 2347–2354.
- Liu Y., Park J., Schnare D., Hill E., Taylor L.A. Characterization of Lunar Dust for Toxicological Studies. II: Texture and Shape Characteristics // Journal of Aerospace Engineering. 2008. V. 21. № 4. P. 272–279.
- Agrell S.O. et al. Observation of the chemistry, mineralogy and petralogy of some Apollo 11 Lunar samples // Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference. 1970. V. 1. P. 93–128.
- Loftus D.J., Rask J.C., McCrossin C.G., Tranfield E.M. The Chemical Reactivity of Lunar Dust: From Toxicity to Astrobiology // Earth, Moon and Planets. 2010. V. 107. P. 95–105. https://doi.org/10.1007/s11038-010-9376-x
- Keller L.P., McKay D.S. Discovery of vapor deposits in the lunar regolith // Science. 1993. V. 261. P. 1305– 1307.
- Morris R.V. The surface exposure of lunar soils; some concepts of Is-FeO compilation // Proc Lunar Planet Sci Conf 9th. 2978. P. 2287–2297.
- Cain J.R. Lunar dust: The Hazard and astronaut exposure risks // Earth Moon and Planets. 2010. V. 107. P. 107–125.
- 33. *Taylor L.A.* Deleterious effects of dust for Lunar base activities: A possible remedy // New views of the Moon workshop. 2000. Lunar Planetary Institute. Abstract.
- Vanoman D. et al. The Lunar environment // Lunar Sourcebook / Ed. Heiken, G.H., Vanoman D.T., French B.M. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 27–60.
- Mitrofanov I.G. et al. Hydrogen Mapping of the Lunar South Pole Using the LRO Neutron Detector Experiment LEND // Science. 2010. V. 330. P. 483–486.
- Katzan C.M., Edwards J.L. Lunar dust transport and potential interactions with power system components // NASA Contractor Report 4404. 1991.
- Christoffersen R. et al. Lunar dust effects on spacesuits systems insights from the Apollo spacesuits // NASA/TR-2009-214786. 2009.
- Murphy T.W. et al. Long-term degradation of optical devices on the Moon // Icarus. 2010. V. 208. P. 31–35. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.02.015
- Linnarsson D. et al. Toxicity of Lunar dust // Planetary and Space Science. 2012. V. 74 (1). P. 57–71. https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.05.023
- 40. *Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M., Collier M.R.* Prediction of dust concentration in the Lunar exosphere // J. Astronautics. 2007. V. 28. P. 166–167.
- Calle C.I., Buhler C.R., McFall J.L., Snyder S.J. Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during Lunar exploration missions // J. of Electrostatics. 2009. V. 67. P. 89–92.

- Severny A.B., Terez E.I., Zvereva A.M. The measurements of sky brightness on Lunokhod-2 // Moon. 1975. V. 14. P. 123–128.
- Gaier J.R. Interpretation of the Apollo 14 Thermal Degradation Sample Experiment // Icarus. 2012. V. 221. I. 1. P. 167–173. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.07.002
- 44. Rosenfeld E.V., Korolev A.V., Zakharov A.V. Lunar nanodust: Is it a borderland between powder and gas? // Adv. Space Res. 2016. V. 58. P. 560–563. https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.022
- Park J.S., Liu Y., Kihm K.D. et al. Submicron particle size distribution of Apollo 11 lunar dust // Earth and Space. 2006. ASCE 2006b.
- Zelenyi L.M. Milestones of the Russian Space Science Program for the Decade 2016–2025 // The Seventh Moscow Solar System Symposium (7MS3). 2016. Abstracts.

- 47. *Кузнецов И.А. и др.* Лунная пыль: свойства и методы исследований // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4 (34). С. 20–32.
- Horányi M., Szalay J., Kempf S. et al. A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon // Nature. 2015. V. 522. P. 324–326. https://doi.org/10.1038/nature14479
- 49. Just G.H., Joy K.H., Roy M.J., Smith K.I. Geotechnical characterisation of two new low-fidelity lunar regolith analogues (UoM-B and UoM-W) for use in large-scale engineering experiments // Acta Astronautica. 2020. V. 173. P. 414–424.
- 50. Planetary Simulant Database From the Colorado School of Mines. https://simulantdb.com/index.php
- Slyta E.N., Grisharina E.A., Makovchuk V.Yu., Agapkin I.A. Lunar soil-analogue VI-75 for largescale experiments // Acta Astronautica 2021. V. 87. P. 447–457.
- 52. *Kleiman J.* Protection of Materials and Structures from Space Environment // Springer. 2017.