

УДК 520.68

ПРИБОР ПмЛ НА ПОСАДОЧНОМ АППАРАТЕ ЛУНА-25: ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЭКЗОСФЕРЕ

© 2021 г. А. В. Захаров^{a,*}, Г. Г. Дольников^a, И. А. Кузнецов^a, А. Н. Ляш^a, А. Е. Дубов^a,
В. В. Афонин^a, С. А. Бедняков^a, А. С. Бычкова^a, В. А. Грушин^a, И. В. Докучаев^a, А. А. Карташева^a,
С. И. Попель^a, И. А. Шашкова^a, А. В. Шеховцова^a, А. В. Яковлев^a, М. М. Васильев^b,
Е. А. Лисин^b, О. Ф. Петров^b, Н. Д. Борисов^c, Л. М. Зеленый^a

^aИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^bОбъединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^cИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Москва, Россия

*e-mail: zakharov@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 02.11.2020 г.

После доработки 05.03.2021 г.

Принята к публикации 16.05.2021 г.

Программа научных исследований лунного посадочного аппарата Луна-25 включает эксперимент “Пылевой мониторинг Луны” (ПмЛ), предусматривающий изучение динамики лунных микрочастиц и параметров приповерхностной пылевой плазмы. С помощью прибора ПмЛ планируется в течение длительного времени проводить регистрацию отдельных микрочастиц над поверхностью Луны, измерение и оценку их физических характеристик (импульс, скорость, заряд, масса, концентрация), а также осуществлять мониторинг динамики параметров приповерхностной плазменно-пылевой среды (плотность, температура, потенциал). Прибор успешно прошел весь комплекс наземных испытаний.

Ключевые слова: Луна, космические исследования, пылевая плазма, лунная экзосфера, безатмосферные тела, реголит, солнечный ветер

DOI: 10.31857/S0320930X21060128

ВВЕДЕНИЕ

Во время первой активной кампании по исследованию Луны советскими и американскими космическими аппаратами в 60-е годы прошлого века неожиданным стало наблюдение периодически возникающего зарева над безвоздушной лунной поверхностью, зарегистрированного теле- и фотокамерами, установленными на пролетных и автоматических посадочных аппаратах. После захода Солнца за горизонт телевизионные камеры посадочных аппаратов Surveyor-5, -6 и -7 (Rennison, Criswell, 1974) временами регистрировали активное постзакатное свечение над поверхностью. Этот эффект, названный Lunar Horizon Glow (LHG), авторы интерпретировали как рассеяние света на микрочастицах, левитирующих над поверхностью на высоте < 1 м под действием электростатических сил. В той же работе, предполагая, что эти частицы сферические, авторы оценили их радиус (~ 5 – 6 мкм) и концентрацию в столбе (~ 50 см⁻³).

Прямая регистрация динамики пылевых частиц над поверхностью Луны была впервые выполнена с помощью эксперимента Lunar Ejecta and Meteorites (LEAM), развернутого на поверхности Луны астронавтами экспедиции Apollo-17 (Berg и др., 1976). Прибор LEAM был создан для регистрации высокоскоростных (от 1 до 25 км/с) микрометеоритов. Однако один из детекторов имел возможность регистрировать низкоскоростные частицы с размером более 100 мкм. Данные этого детектора дали неожиданные результаты о достаточно высоких потоках низкоскоростных (~ 100 – 1000 м/с) частиц, заряд которых обычно составлял более 10^{-12} Кл. За время работы прибора максимальная скорость счета детекторов наблюдалась в районе светотеневого терминатора, причем наиболее значительное увеличение потоков таких низкоскоростных частиц происходило на восходе Солнца. Эти данные, в силу определенных особенностей измерений, безусловно, требовали дальнейшей проверки.

Другим “пылевым” экспериментом, выполненным по программе Apollo, можно считать проведенные оценки скорости осаждения пылевых частиц на элементы солнечных панелей по данным измерений их выходного напряжения Dust Detector Experiment (DDE, O'Brien, 2009). Первые результаты показали, что осаждение пыли было меньше ожидаемого, однако последующий анализ данных показал, что на полученные результаты могли влиять такие дополнительные факторы, приводящие к частичному очищению поверхности солнечных элементов, как, например, взлет десантного модуля с поверхности Луны или воздействие солнечной радиации (O'Brien, 2011).

При подготовке пилотируемой программы исследований Луны Apollo факт наличия пылевых частиц над поверхностью Луны и некоторые особенности их поведения уже были известны и, так или иначе, учитывались (Gaier, 2005). Однако, по мнению американских астронавтов, работавших по этой программе, именно фактор лунной пыли оказался самым неожиданным и неприятным по степени воздействия на посадочный аппарат, его системы, деятельность астронавтов на поверхности Луны и их здоровье (Gaier, 2005). Американские астронавты также видели и фотографировали рассеянное на пылевых частицах свечение во время маневров перелетных модулей с высот в несколько десятков километров над поверхностью Луны (Zook, McCoy, 1991; Zook и др., 1995).

Помимо наблюдательных данных о поведении пылевых частиц у лунной поверхности, при выполнении экспериментов по программе Apollo были получены и другие важные результаты, связанные с особенностями протекания лунных пылевых процессов. Так, например, с помощью эксперимента Suprathermal Ion Detector Experiment (SIDE), проводившегося в местах посадки аппаратов Apollo-12, -14 и -15 (Freeman, Ibrahim, 1975), было обнаружено, что лунная поверхность в разных точках имеет разный электрический потенциал. На дневной поверхности Луны в широтном диапазоне $\pm 45^\circ$ от подсолнечной точки электрический потенциал поверхности составляет около +10 В. С увеличением зенитного угла Солнца потенциал быстро падает, у терминатора становится отрицательным и может достигать –100 В (Freeman, Ibrahim, 1975).

Результаты, полученные в первых лунных экспедициях, послужили основой для проведения в последующие десятилетия различных теоретических и экспериментальных исследований, направленных на выяснение природы приповерхностных пылевых явлений (Stubbs и др., 2007; Grün и др., 2011; Horányi, Szalay, 2015; Kuznetsov и др., 2017). Луна, как и все тела, лишённые атмосферы и дипольного магнитного поля, постоянно

бомбардируется микрометеоритами и подвергается прямому воздействию солнечного ветра, солнечных и галактических космических лучей (Langevin и др., 1977; Taylor, 1982; Langevin, 1982; Taylor и др., 1991). Эти процессы известны под общим названием *космического выветривания* (*space weathering*) (Pieters и др., 1993). Под действием указанных внешних факторов могут происходить не только длительные эволюционные процессы формирования реголита, изменения его структуры и минералогического состава (Heiken, 1975; McKay и др., 1974), но и активные плазменно-пылевые процессы, определяющие текущее состояние лунной экзосферы и динамику микрочастиц реголита в приповерхностной среде. Вследствие этого у поверхности Луны постоянно присутствует мобильная и сферически неоднородная плазменно-пылевая оболочка, которая включает в себя пылевые микрочастицы реголита, фотоэлектроны, эмитированные с реголитных поверхностей, и наконец, заряженные частицы внешнего происхождения, приходящие в составе потоков солнечного ветра и плазмы геомагнитного хвоста (Colwell и др., 2007).

Поток микрометеоритов кометного и астероидного происхождения, падающих на Луну, так же, как и на Землю, является изотропным (Grün и др., 1985; 2011). Его величина оценивается примерно в $1 \text{ см}^{-2} \text{ год}^{-1}$ для частиц размером более 1 мкм (Brownlee и др., 1972). Плотность метеороидных частиц обычно близка к значению 2.5 г/см^3 . Большинство этих частиц имеют размеры от 10 нм до 1 мм, а скорость соударения находится в интервале от 10 до 72 км/с (Grün и др., 1985; 2011). Значительная доля вещества, выбрасываемого с поверхности Луны в результате высокоскоростных ударов микрометеоритов об эту поверхность, возвращается затем обратно. Поток осаждающихся на лунную поверхность вторичных частиц реголита с размером более 1 мкм оценивается как $\sim 800 \text{ см}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Brownlee и др., 1972). Что же касается концентрации левитирующих у поверхности частиц, эти оценки могут отличаться у разных авторов на несколько порядков. Сведения о параметрах микрометеоритов, вторичных частиц и левитирующей лунной пыли приведены в табл. 1.

Солнечный ветер, истекающий из солнечной короны, представляет собой поток электронов, протонов, а также, в относительно малом количестве, ядер гелия и других элементов (Anders, Grevesse, 1989). Средняя скорость частиц спокойного солнечного ветра на расстоянии 1 а. е. составляет $\sim 400 \text{ км/с}$, но может значительно меняться в зависимости от активности Солнца (Schwenn, Marsch, 2012). Плотность плазмы солнечного ветра вблизи орбиты Земля–Луна составляет $\sim 10 \text{ см}^{-3}$ (Artemyev и др., 2018). При падении на лунную поверхность основная масса

Таблица 1. Оценочные данные о микрочастицах над поверхностью Луны (Brownlee, 1973; Grün и др., 1985; 2011; Popel и др., 2013)

Разновидность частиц	Размеры частиц	Скорость частиц	Концентрация/поток частиц	Заряд
Микрометеориты	10 нм–1 мм	10–70 км с ⁻¹	~1 см ⁻² год ⁻¹ для частиц >1 мкм	–
Вторичные частицы	10 нм–1 мм	10 м с ⁻¹ –5 км с ⁻¹	~10 ³ см ⁻² год ⁻¹ для частиц >1 мкм	–
Левитирующие частицы	10 нм–5 мкм	1–10 м с ⁻¹	≥10 ² см ⁻¹ (зависит от высоты)	>10 ³

Таблица 2. Ожидаемые параметры плазмы над поверхностью Луны для медленного (S) и быстрого (F) солнечного ветра (СВ)

Носитель заряда	Концентрация n , см ⁻³	Температура, эВ	Характеристическая скорость, м/с	Дебаевская длина, м
Электроны СВ	$n_{eS} = 10$	$T_{eS} = 12.1$	$(3-4) \times 10^5$	15
	$n_{eF} = 5$	$T_{eF} = 12.1$	$(8-9) \times 10^5$	
Ионы СВ	$n_{iS} = 10$	$T_{iS} = 8.6$	$(3-4) \times 10^5$	15
	$n_{iF} = 5$	$T_{iF} = 12.9$	$(8-9) \times 10^5$	
Фотоэлектроны	139	1.47	6.5×10^5	1
Отраженные ионы	~10–20% падающего потока	–	–	–
Геомагнитный хвост	10 ⁻³ –10 ⁻² (доли хвоста) 0.05–0.20 (плазм. слой)	$(1-5) \times 10^3$	–	–

ионов поглощается реголитом. Не адсорбированная верхним поверхностным слоем часть ионов (~10–20%) захватывает электроны и рассеивается в виде нейтральных атомов (McComas и др., 2009; Wieser и др., 2009; Lue и др., 2018). При этом небольшая их часть (~0.1–1.0%), отражаясь от поверхности, сохраняет положительный заряд (Saito и др., 2008). Поток ионов солнечного ветра крайне изменчив во времени, и его плотность, в среднем, может оцениваться величиной $4.5 \times 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Wurz и др., 2007). Учитывая, что ~95% ионов составляют протоны, этот поток соответствует $8.5 \times 10^{-15} \text{ кг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Таким образом, общее количество солнечного вещества, имплантируемого в лунный реголит, составляет $4.3 \times 10^{25} \text{ с}^{-1}$, или 0.081 кг с^{-1} , что приблизительно в 4 раза больше потока попадающих на Луну микрометеоритов (Wurz и др., 2007).

В процессе своего орбитального движения Луна пересекает хвост магнитосферы Земли и приблизительно в течение 30% лунных суток (~9 земных дней) оказывается под воздействием магнитосферной плазмы. Структура земной магнитосферы достаточно сложна, крайне динамична и во многом зависит от текущей интенсивности солнечного ветра и активности Солнца. В северной и южной долях магнитосферного хвоста плотность плазмы очень мала: 10^{-3} – 10^{-2} см^{-3} (Peterson, Shelley, 1984). В плазменном слое магнитосферного хвоста, который разделяет северную и южную доли, плотность плазмы составляет

0.05 – 0.2 см^{-3} , но характеризуется высокой температурой ионов (1–5 кэВ) и сильно изменчивой скоростью (10–1000 км/с) (Frank, 1985).

Ожидаемые параметры плазмы над поверхностью Луны представлены в табл. 2 (Poppe, Horányi, 2010; McComas и др., 2009; Wieser и др., 2009; Peterson, Shelley, 1984; Frank, 1985; Stubbs и др., 2014; Baumjohann, Treumann, 1996).

Перечисленные факторы, в целом, определяют состояние и динамику приповерхностной экзосферы Луны.

За несколько десятилетий, прошедших со времени начала исследований Луны с помощью посадочных аппаратов, представления о характере процессов в лунной экзосфере и об основных факторах, их определяющих, безусловно, заметно усовершенствовались, хотя многое пока остается неясным. Сейчас, когда ведущие космические державы все большее внимание уделяют развитию своих программ исследований и будущего освоения Луны, необходимость в таких знаниях значительно возрастает — особенно, учитывая степень возможного влияния лунной приповерхностной плазменно-пылевой среды на работоспособность инженерных систем посадочных аппаратов и безопасность жизнедеятельности участников пилотируемых экспедиций.

Научная и практическая значимость исследований в данной области, их актуальность в связи с подготовкой и реализацией российской лунной

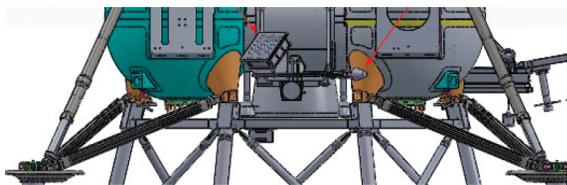


Рис. 1. Расположение блока УС и блоков ЭД на посадочном аппарате. Слева — фрагмент посадочного аппарата с указанием расположения блоков УС и двух блоков ЭД. Справа — вид кронштейна с блоком УС и ЭД.



Рис. 2. Внешний вид блока УС.

программы явились основной мотивацией к созданию прибора “Пылевой мониторинг Луны” (Пмл), включенного в состав комплекса научной аппаратуры посадочного аппарата Луна-25.

Данная статья посвящена описанию прибора Пылевой мониторинг Луны (Пмл), разработанного в ИКИ РАН и предназначенного для изучения динамики пылевых частиц и параметров плазмы вблизи лунной поверхности.

НАЗНАЧЕНИЕ И СОСТАВ ПРИБОРА

Прибор Пмл создан для проведения экспериментов по регистрации пылевых частиц и определению параметров плазмы над поверхностью Луны. Он устанавливается на посадочный аппарат Луна-25 (Кузнецов и др., 2016; Kuznetsov и др., 2017), позволяя регистрировать пылевые частицы, попадающие в датчики прибора, и одновременно измерять их физические характеристики — импульс, заряд, скорость, с возможностью оценки массы частиц. С помощью прибора также будут проводиться измерения характеристик приповерхностной плазмы и зарядопереноса в плазменно-пылевой среде вблизи посадочного аппарата. Работа прибора в режиме непрерывного мониторинга при нахождении аппарата на дневной

стороне Луны и при прохождении терминатора позволит изучать влияние на измеряемые величины положения Солнца относительно космического аппарата (КА) и, возможно, особенностей локального рельефа местности.

Прибор Пмл состоит из трех блоков: ударный сенсор (УС) и два выносных блока электростатических датчиков (ЭД). Блок УС является основным, подключается к бортовым фидерам питания и связи через блок управления научной информацией (БУНИ) и содержит всю измерительную и управляющую электронику.

Блок УС установлен на специальный кронштейн термостабилизированной платформы таким образом, чтобы иметь наиболее удаленное от элементов КА расположение, без затенения апертуры прибора элементами КА. Расстояние от поверхности реголита до прибора составляет от 0.5 до 0.7 м (в зависимости от условий посадки). Датчики ЭД расположены на посадочном аппарате на расстоянии ~0.7 м друг от друга по вертикали. Расположение блоков на КА показано на рис. 1.

Блок УС включает два типа датчиков: пьезоэлектрические сенсоры (ПС) для регистрации импульсов пылевых частиц и зарядочувствительную сетку для измерения зарядов частиц, пролетающих сквозь сетку. На верхней панели прибора расположены 24 керамических ПС размером 30×23 мм для создания как можно большей апертуры регистрации пылевых частиц в пределах ограничений по габаритам прибора. Размер апертуры блока УС составляет 165.6 см^2 . Каждый датчик для повышения чувствительности подключен к собственному усилителю. Зарядочувствительная сетка расположена над пластинами ПС на расстоянии 8 мм и подключена к зарядочувствительному усилителю. Регистрация пролета заряженной частицы через сетку происходит вследствие наведения (индукции) зеркального заряда в проводнике при пролете заряженной частицы.

Внешний вид блока УС представлен на рис. 2.

Принцип регистрации механического импульса и электрического заряда пылевых частиц датчиками блока УС иллюстрирует рис. 3.

Фиксируя время двух событий — пролета частицы через сетку и соударения частицы с пьезоэлектрическим сенсором — и измеряя амплитуду отклика ПС, можно определить скорость частицы (с точностью до угла подлета), а также оценить ее массу. Измерение же наведенного заряда в металле сетки позволяет определить заряд частицы (положительно или отрицательно заряженной).

В целях устранения систематической погрешности измерений, вносимой разностью потенциалов между сеткой и пьезопластинами, которая могла бы дополнительно ускорять или тормозить частицы, предусмотрено заземление этих частей

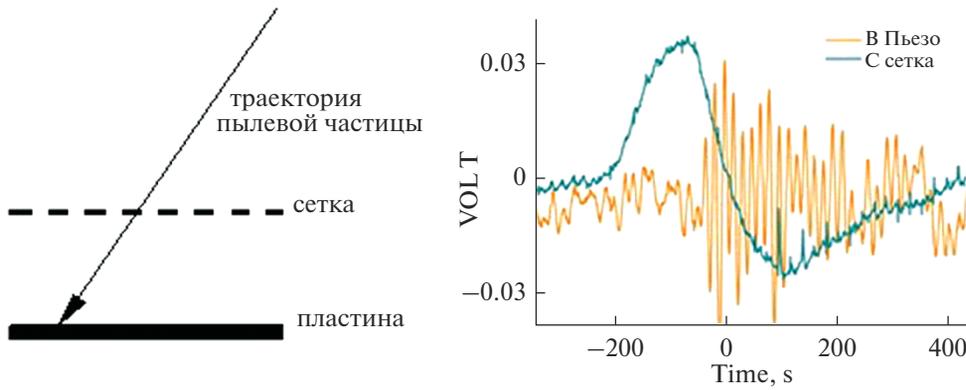


Рис. 3. Схема регистрации и характер измеряемых сигналов от пылевых частиц.

прибора: сенсоров – напрямую, а сеток – через плату усилителей. Тем не менее, поскольку релаксация заряда занимает конечное время, разница потенциалов при больших потоках частиц может становиться заметной. Однако ожидаемые потоки пылевых частиц у поверхности Луны, даже по самым оптимистическим оценкам, столь невелики, что увеличение скорости счета ударными детекторами, как ожидается, может наблюдаться только при регистрации вторичных частиц, образованных после ударов микрометеоритов в непосредственной близости от посадочного аппарата.

Блоки ЭД не содержат электронных компонентов и подключены к блоку УС межблочными кабелями. Конструктивно в блоке ЭД объединены два типа датчиков: электрод датчика заряда, выполненный в виде усеченной конусообразной поверхности, и электрически изолированный электрод плоского зонда Ленгмюра, расположенный на торце ЭД. Измерительная часть электроники зондов находится в блоке УС. Внешний вид блока ЭД представлен на рис. 4.

Датчик заряда блока ЭД позволяет измерять заряд пылевых частиц при их непосредственном контакте с поверхностью или при пролете вблизи электрода. Работая таким образом в режиме электрометра, он способен измерять зарядоперенос в случае появления направленного потока заряженных пылевых частиц.

Зонд Ленгмюра блока ЭД предназначен для измерений параметров окружающей плазмы при потенциале смещения относительно корпуса КА в диапазоне ± 88 В.

Основные технические характеристики прибора ПМЛ приведены в табл. 3.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ

Функциональная схема работы блока УС в части регистрации пылевых частиц представлена на рис. 5. Сигнал с датчиков усиливается операционными усилителями (ОУ), расположенными на плате усилителей, затем оцифровывается аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) и под управлением программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) записывается в оперативную память (ОЗУ). В момент наступления очередного события ПЛИС перемещает данные в энергонезависимую Flash-память, где они ожидают отправки в блок управления научной информацией (БУНИ), через который также осуществляется энергопотребление с использованием модуля вторичных источников питания (ВИП).

Для выполнения программы экспериментов с помощью прибора ПМЛ планируется использо-



Рис. 4. Внешний вид блоков ЭД.

Таблица 3. Основные технические характеристики прибора ПмЛ

ПмЛ	Масса прибора (с межблочными кабелями), кг	1.07 ± 0.10
	Потребляемая мощность, Вт, номинальный режим/максимальное потребление	3/5
	Температурный диапазон работы, °С	–40...+65
	Режим работы	Непрерывный
	Интерфейс обмена	RS-485
	Напряжение питания	27 В
Блок УС	Масса, кг	0.89
	Габариты, Д × Ш × В, мм	173 × 153 × 50
Блок ЭД	Масса, кг	0.05
	Габариты, Ø × В, мм	60 × 125

вать его в нескольких режимах работы: “Тестовый”, “Измерение”, “Измерение при пониженном энергопотреблении”, “Измерение плазмы”, “Обслуживание”. Каждый из них может быть задействован путем подачи специальных управляющих команд. Эти режимы можно гибко настраивать в процессе работы, меняя, к примеру, длительность работы или частоту включения зондов Ленгмюра.

Базовый сценарий работы предполагает непрерывную работу в режиме “Измерение” в течение длительного времени (один цикл измерения составляет 2 ч). В этом режиме в начале каждого цикла измерения проводится автоматическая калибровка пьезодатчиков с сохранением результатов в памяти прибора (длительность калибровки не превышает одной минуты). Затем происходит включение зондов Ленгмюра, и на каждом из них проводится по три измерения, общая продолжительность которых составляет около 60 с. Далее включаются все группы пьезодатчиков и индукционных сенсоров и осуществляется регистрация пылевых частиц до окончания очередного цикла измерения. Все экспериментальные данные сохраняются в памяти прибора и передаются в БУНИ в конце каждого цикла. Общее количество

циклов измерений не ограничено и определяется только временем включения прибора.

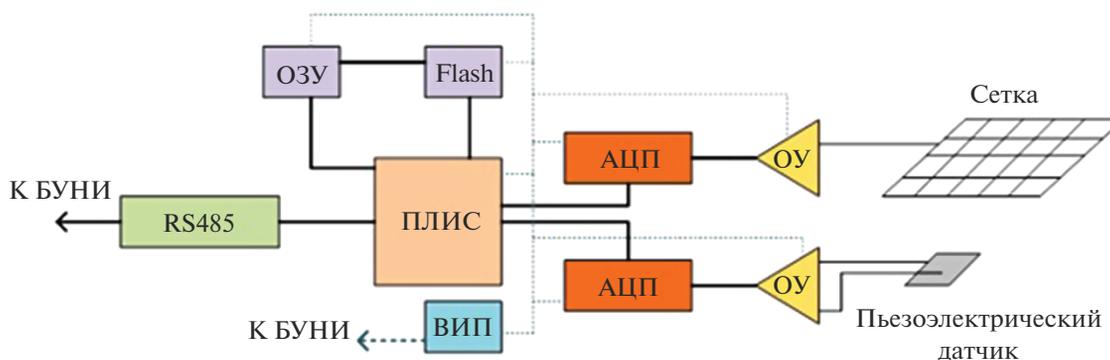
В режиме “Тестовый” проводится калибровка датчиков без регистрации пылевых частиц и работы зондов Ленгмюра. Результаты калибровки передаются в БУНИ.

Режим “Измерение при пониженном энергопотреблении” предполагает работу прибора без включения зондов Ленгмюра.

Режим “Измерение плазмы” предусматривает однократное включение зондов Ленгмюра и используется для привязки измерения к определенному времени проведения эксперимента.

Режим “Обслуживание” используется для тонкой настройки прибора. С помощью сервисных команд можно осуществить включение/отключение отдельных датчиков, стирание памяти, изменение порогов срабатывания и т.д.

Предусматривается непрерывная работа прибора в течение каждого из периодов нахождения посадочного аппарата на освещенной стороне Луны. В ночное время возможности для использования научных приборов крайне ограничены, но ожидается, что, во всяком случае, в пределах нескольких часов после захода Солнца и перед

**Рис. 5.** Функциональная схема блока УС.

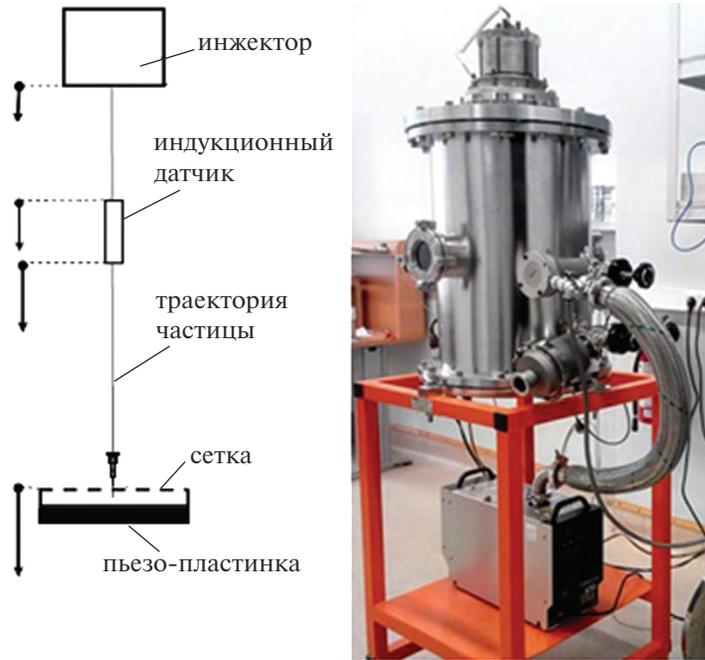


Рис. 6. Схема испытаний и калибровки датчиков УС прибора ПмЛ в вакуумной камере (слева). Установка для проведения испытаний и калибровок (справа).

его восходом измерения с помощью прибора ПмЛ будут также осуществимы, хотя и в экономном режиме.

КАЛИБРОВКА

Испытания и калибровки датчиков прибора проводились на оборудовании Института космических исследований РАН и Объединенного института высоких температур РАН. Вакуумная камера ИКИ РАН оснащена инжектором заряженных частиц и измерительной аппаратурой, позволяющей имитировать различные особенности лунных условий, а также формировать потоки заряженных пылевых частиц с контролируемыми значениями скоростей, масс и зарядов. Схема и фотография установки приведены на рис. 6. Инжектор микрочастиц (Акишин, Новиков, 1990) позволяет создавать потоки заряженных частиц размерами от 10 до 300 мкм со скоростями от 2 до 40 м/с. Для контроля заряда и скорости частиц в вакуумной камере размещается индукционный датчик, подключенный к калиброванному зарядочувствительному усилителю.

Инжекция пылевых частиц является случайным процессом. Скорости инжектируемых частиц и их заряд зависят от напряжения на инжекторе, размера пылевых частиц и их физических свойств. Для увеличения точности калибровки накапливается большой массив данных с целью последующего усреднения при различных напря-

жениях на инжекторе и для различных наборов частиц.

На рис. 7 приведен пример записи ударным датчиком УС прибора ПмЛ сигналов при пролете заряженной частицы. Амплитуда сигнала определяет механический импульс регистрируемой частицы mv . По измеренным временным интервалам между сигналами от индукционной сетки и пьезокерамической пластины при известной геометрии эксперимента рассчитывается скорость частицы v и оценивается ее масса m . Сравнение амплитуд сигналов от индукционного датчика вакуумной камеры и сетки прибора позволяет методом кросс-калибровки определить чувствительность прибора.

Заряд пылевой частицы, вылетающей из инжектора, определялся по величине сигнала индукционного датчика. На рис. 8 приведены результаты кросс-калибровки по измерению величины заряда частиц, вылетающих из инжектора. Сравнивались сигналы двух индукционных датчиков, через которые пролетала частица, — индукционного датчика вакуумной камеры и зарядочувствительной сетки прибора. Кроме того, для подтверждения достоверности измеряемых величин были проведены измерения коэффициентов преобразования тестового заряда в вольты и единицы АЦП. Для этого на входы зарядочувствительных усилителей сетки и датчиков ЭД через эталонный конденсатор подавался импульс напряжения фиксированной амплитуды.

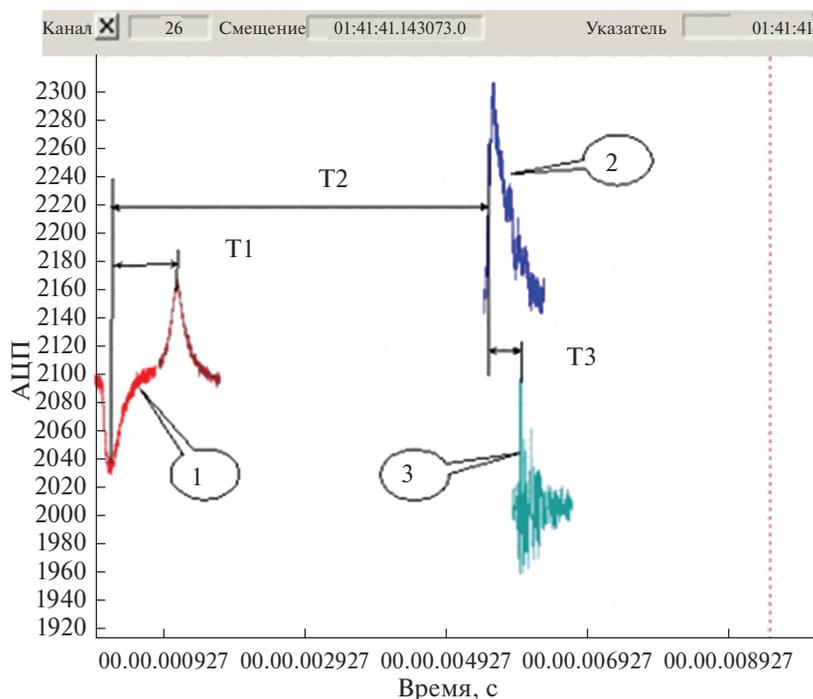


Рис. 7. Временная развертка сигналов при пролете заряженной частицы. (1) сигнал индукционного датчика вакуумной камеры; (2) сигнал от сетки блока УС; (3) сигнал пьезодатчика. T1 – время пролета частицы через индукционный датчик, T2 – время пролета частицы от верха индукционного датчика камеры до сетки блока УС, T3 – время пролета частицы от сетки к пьезодатчику. Величина сигнала с датчиков после усиления представлена в единицах отсчетов АЦП.

Полученная экспериментальная величина порога регистрации составила от 1000 до 3000 зарядов электрона на частицу размером в интервале 10–40 мкм. Порог регистрации определен как превышение в 3σ над средним значением уровня шума, измеряемого на установке, где σ – стандартное отклонение сигнала за исследуемый про-

межуток времени. Следует отметить, что уровень порога регистрации в условиях космического эксперимента может быть значительно ниже ввиду отсутствия характерных источников шума в виде электрических наводок.

Физическая калибровка отклика пьезодатчиков в зависимости от импульса частиц производилась по данным измерения скорости частиц и результатам расчета их массы. Для оценки массы микрочастиц использовались два подхода. В одном случае, с помощью микроскопа определялись линейные размеры частиц и затем рассчитывались средние значения массы для сфер эквивалентного объема, исходя из известной плотности материала частиц. В другом случае, массы находились из уравнений энергетического баланса по экспериментально измеренным зарядам и скорости при известном ускоряющем напряжении на инжекторе. Оба метода следует считать пока весьма приближенными, поскольку по результатам проведенных опытов оценка масс частиц посредством измерения размеров оказалась в 2–3 раза выше оценки, полученной по данным измерений на инжекторе. Отчасти такую разницу можно объяснить отличием формы частиц от сферичности, так что точность метода, вероятно, можно будет в дальнейшем повысить за счет использования более однородных по форме и размеру калиб-

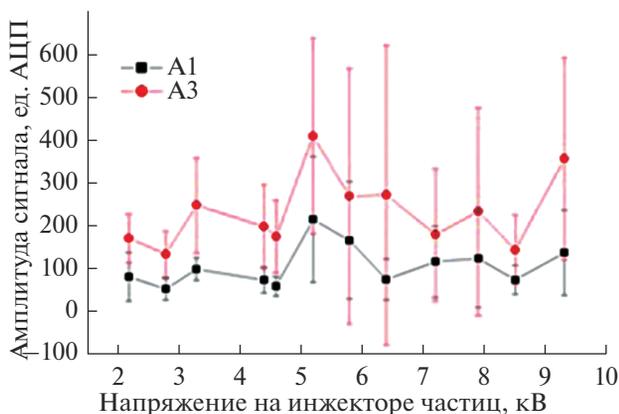


Рис. 8. Зависимость амплитуды сигнала в единицах АЦП индукционного датчика вакуумной камеры (A1) и электрода сетки прибора (A3) от напряжения на инжекторе.

ровочных образцов. В случае микрочастиц, однако, приготовление таких проб представляет собой весьма непростую задачу.

Полученные верхние граничные оценки масс частиц использовались далее для определения чувствительности прибора по импульсу, которая составила 4.5×10^{-12} Н с. Это означает, что прибор способен обнаруживать, например, движущиеся со скоростями 3 м/с частицы с массой менее 1.5×10^{-3} мкг, входящие в число ожидаемых представителей лунной приповерхностной пылевой популяции.

Возможности существующей вакуумной установки не позволяют использовать в экспериментах частицы с размером менее 10 мкм. Однако результаты опытов с частицами большего размера и данные о величине отношения полезного сигнала к шуму прибора дают основания предполагать, что его чувствительность по импульсу может достигать величины 10^{-13} Н с.

Испытания зондов Ленгмюра прибора ПМЛ проводились в вакуумной камере, выполнявшей функции вакуумного диода с контролируемыми параметрами. Термоэмиссионная плазма создавалась вольфрамовой нитью лампы накаливания – катодом, установленным в центре камеры. Корпус камеры служил анодом. Остаточное давление газа в вакуумной камере составляло 10^{-3} торр. Пример полученных вольт-амперных характеристик плазмы (ВАХ) для различного тока накала катода и анодного потенциала приведен на рис. 9. Кроме того, при освещении объема камеры жестким УФ-излучением эксимерной лампы (длина волны 174 нм) и повышении остаточного давления газа до 0.1 мбар были получены качественные результаты по регистрации ионной ветви ВАХ. Полученные данные позволили количественно оценить диапазон и точность измерений потенциала плазмы и токов на плоский зонд Ленгмюра.

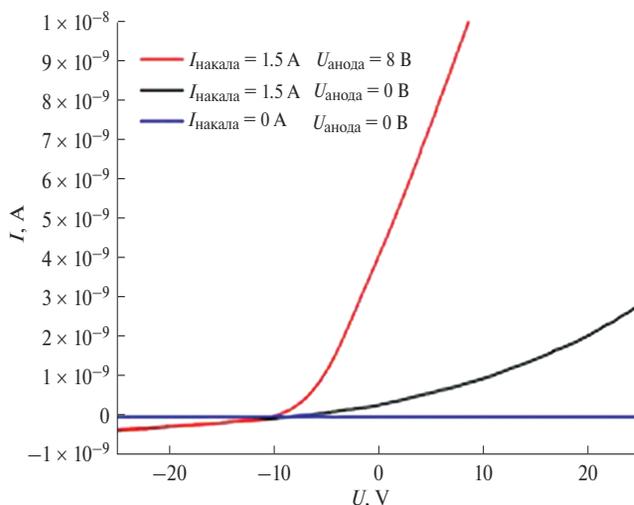


Рис. 9. ВАХ плазмы, измеренные зондом Ленгмюра (потенциал зонда изменяется относительно опорного электрода – корпуса камеры).

В итоговой табл. 4 представлены измеряемые прибором физические величины, диапазоны и пороги их регистрации, полученные в ходе калибровок прибора ПМЛ.

ВЛИЯНИЕ ПОСАДОЧНОГО АППАРАТА

К сожалению, для данного прибора не было возможности установить датчики на штанге в целях уменьшения влияния посадочного аппарата на окружающую плазму и приповерхностное электростатическое поле. Для оценки такого влияния было выполнено численное моделирование методом “частиц в ячейках” (PiC) (Kuznetsov и др., 2018). При моделировании были использованы ожидаемые параметры плазмы в приповерхностной зоне Луны, находящейся в условиях воздействия солнечного ветра (см. табл. 2). При этом

Таблица 4. Измерительные возможности прибора ПМЛ

Изменяемый параметр	Диапазон ¹⁾	Порог обнаружения ²⁾	Относительная ошибка, %
Заряд частиц ³⁾ , ±	100–200000	1500	<30
Механический импульс частиц, Н с	10^{-12} – 10^{-9} (свыше 10^{-9} также в режиме регистрации событий)	4.5×10^{-12}	50
Скорость заряженных частиц, м/с	0.1–1000	–	5
Потенциал плазмы, В	От – 88 до +88	–	<1
Ток плазмы на зонд, А	3×10^{-12} – 10^{-8}	8×10^{-11}	<30

Примечания:

- 1) диапазон измерений определяется ценой деления и разрядностью АЦП прибора;
- 2) порог обнаружения определяется по критерию 3σ превышения сигнала над уровнем шума;
- 3) положительных или отрицательных частиц.

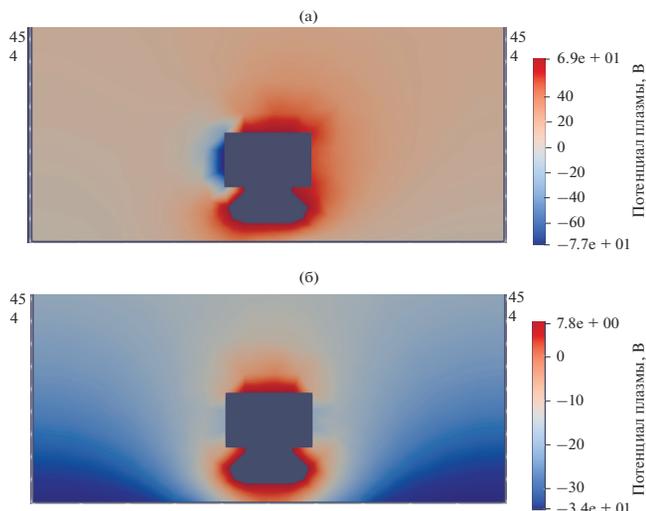


Рис. 10. Результаты численного моделирования влияния КА на плазменное окружение. (а) Виден значительный разброс (более 140 В) для случая “вечер” в окружении КА (порядка 0.15 м). (б) Для случая “закат” наблюдается снижение размаха потенциала для области моделирования, но вместе с тем можно наблюдать, что вблизи КА потенциал плазмы положителен, в то время как поверхность Луны уже приобрела отрицательный заряд.

учитывались также близкая к реальной конфигурация посадочного аппарата Луна-Глоб и планируемое место посадки ($\sim 68^\circ$ ю.ш.). Особое внима-

ние было уделено соответствию материалов внешних поверхностей КА реальным, а также учету свойств лунного реголита в предполагаемом месте посадки. Рассматривались три различных варианта расположения Солнца относительно аппарата:

- “полдень” (22° над горизонтом, к северу от КА);
- “вечер” (11° над горизонтом, к северо-западу от КА);
- “закат” (1° над горизонтом, запад).

В результате моделирования стало возможным качественно определить характер взаимовлияния КА и окружающей его плазмы (в том числе в районе расположения солнечных панелей с непроводящим покрытием), а также получить количественные оценки смещения потенциалов плазмы в точках расположения электродов зондов Ленгмюра (рис. 10). Эти результаты, в частности, говорят о необходимости более корректной интерпретации данных, получаемых с этих зондов, одновременно демонстрируя потенциал использования методов численного моделирования для дополнительной верификации получаемых данных.

В результате моделирования удалось также получить численные значения концентрации электростатически левитирующей пыли вблизи поверхности Луны (рис. 11).

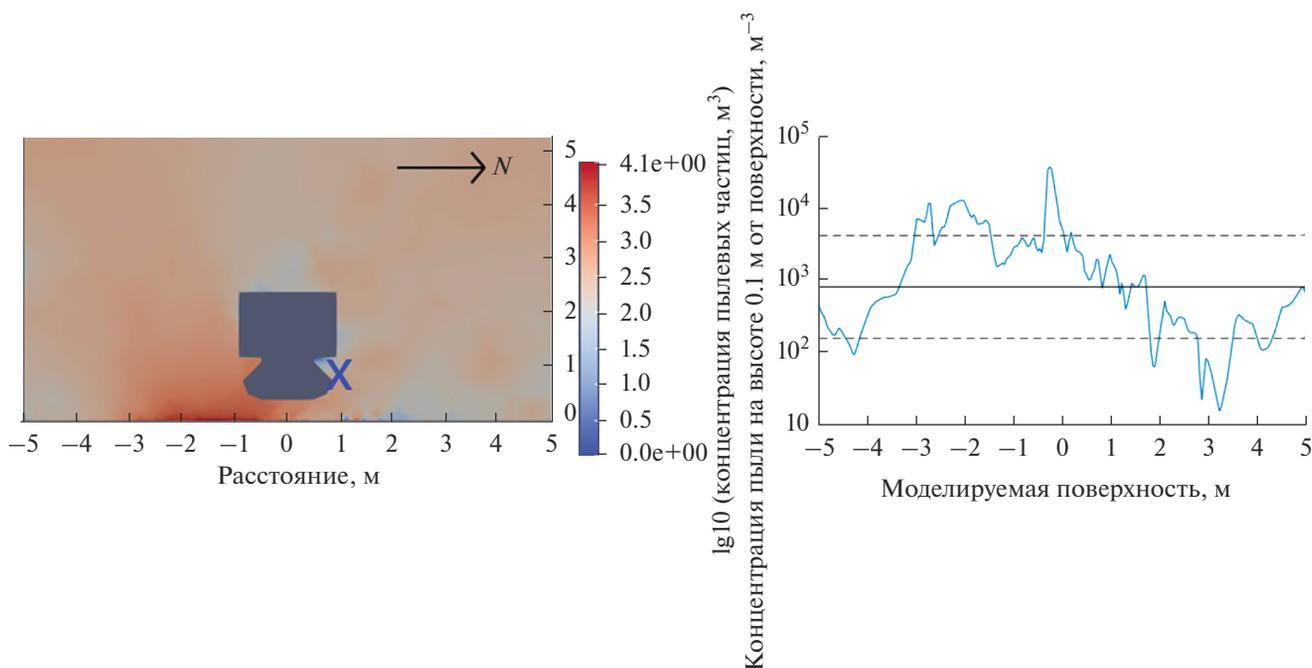


Рис. 11. Слева: десятичный логарифм концентрации пылевых частиц для случая “полдень”. Синим значком “косой крест” указано место расположения блока УС. Справа: концентрация пылевых частиц на высоте 10 см в случае “полдень” по результатам численного моделирования (синий цвет), среднее значение $7.9 \times 10^2 \text{ м}^{-3}$ (черный цвет) и диапазон значений в пределах среднеквадратичного отклонения (пунктирные линии).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте космических исследований Российской академии наук создан прибор ПМЛ для исследования динамики пылевых частиц и параметров плазмы в приповерхностной экзосфере Луны. Прибор включен в состав комплекса научной аппаратуры лунного посадочного аппарата Луна-25. Прибор способен измерять механический импульс (от 4.5×10^{-12} Н с) и электрический заряд (от 1500 \bar{e}) пылевых частиц вблизи поверхности Луны, а также определять основные параметры плазмы по измерениям вольт-амперной зонда с возможностью регистрации токов $>8 \times 10^{-11}$ А. Испытания прибора показали его работоспособность в условиях, ожидаемых в районе посадки, и подтвердили заявленные функциональные возможности для проведения плазменно-пылевых измерений в пределах значений физических параметров, характерных для лунной экзосферы. К сожалению, на посадочном аппарате Луна-25 не было возможности установить датчики для регистрации пылевых частиц и измерений параметров плазмы на штанге с целью вынести их за пределы влияния аппарата. Поэтому с помощью методов численного моделирования были проведены исследования степени воздействия космического аппарата на плазменно-пылевую среду с целью учета этого влияния на результаты измерений.

Прибор создан в ИКИ РАН. Испытания прибора проведены в ИКИ РАН с участием АО «НПО Лавочкина» и ОИВТ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акишин А.И., Новиков Л.С. Методика и оборудование имитационных испытаний материалов космических аппаратов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 90 с.
- 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 // Вестн. НПО. 2016. № 4. С. 20–32.
- Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1989. V. 53. P. 197–214.
- Artemyev A.V., Angelopoulos V., McTiernan J.M. Near-Earth solar wind: Plasma characteristics from ARTEMIS measurements // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2018. V. 123. P. 9955–9962.
- Baumjohann W., Treumann R.A. Basic space plasma physics. London: Imperial College Press, 1996. 340 p.
- Berg O.E., Wolf H., Rhee J. Lunar soil movement registered by the Apollo 17 cosmic dust experiment // *Interplanetary Dust and Zodiacal Light. Lecture Notes in Physics*. V. 48. P. 233–237. Springer. Berlin, Heidelberg, 1976.
- Brownlee D., Bucher W., Hodge P. Primary and secondary micrometeoroid impact rate on the lunar surface: Direct measurements // *Analysis of Surveyor 3 material and photographs returned by Apollo 12*. NASA SP. 1972. P. 143–151.
- Brownlee D.E., Hörz F., Vedder J.F., Gault D.E., Hartung J.B. Some physical parameters of micrometeoroids // *Lunar and Planet. Sci. Conf. Proc.* 1973. V. 4. P. 3197.
- Colwell J., Batiste S., Horányi M., Robertson S., Sture S. Lunar Surface: Dust dynamics and regolith mechanics // *Rev. Geophys.* 2007. V. 45. № 2. RG2006. P. 1–26.
- Frank L. Plasmas in the Earth's magnetotail // *Space Sci. Rev.* 1985. V. 42. P. 211–240.
- Freeman J.W., Ibrahim M. Lunar electric fields, surface potential and associated plasma sheaths // *The Moon*. 1975. V. 14. P. 103–114.
- Gaier J. Effects of Lunar Dust on EVA Systems During the Apollo Missions. TNASA/TM – 2005-213610, NASA Center for Aerospace Information, Hanover, 2005. P. 1–66.
- Grün E., Zook H.A., Fechtig H., Giese R.H. Collisional balance of the meteoritic complex // *Icarus*. 1985. V. 62. P. 244–272.
- Grün E., Horányi M., Sternovsky Z. The lunar dust environment. // *Planetary and Space Science*. 2011. V. 59. № 14. P. 1672–1680.
- Heiken G. Petrology of lunar soils // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1975. V. 13. № 4. P. 567–587.
- Horányi M., Szalay J. Dust charge measurements by the Lunar Dust Experiment // *IEEE Aerospace Conf. Proc.* 2015. P. 1–5.
- Kuznetsov I.A., Zakharov A.V., Dolnikov G.G., Lyash A.N., Afonin V.V., Popel S.I., Shashkova I.A., Borisov N.D. Lunar Dust: Properties and Investigation Techniques // *Solar System Research*. 2017. V. 51. № 7. P. 611–622.
- Kuznetsov I.A., Hess S.L.G., Zakharov A.V., Cipriani F., Seran E., Popel S.I., Lisin E.A., Petrov O.F., Dolnikov G.G., Lyash A.N., Kopnin S.I. Numerical modelling of the Luna-Glob lander electric charging on the lunar surface with SPIS-DUST // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 156. P. 62–70.
- Langevin Y., Arnold J.R. The evolution of the lunar regolith // *Annu. Rev. Earth and Planet. Sci.* 1977. V. 5. P. 449–489.
- Langevin Y. Evolution of an asteroidal regolith: Granulometry, mixing and maturity // *Workshop on Lunar Breccias and Soils and Their Meteoritic Analogs*. LPI Tech. Rpt. 82–02. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1982. P. 87–93.
- Lue C., Halekas J., Poppe A., McFadden J. ARTEMIS observations of solar wind proton scattering off the lunar surface // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2018. V. 123. P. 5289–5299.
- McComas D.J., Allegrini F., Bochsler P., Frisch P., Funsten H.O., Gruntman M., Janzen P.H., Kucharek H., Möbius E., Reisenfeld D.B., Schwadron N.A. Lunar backscatter and neutralization of the solar wind: First observations of neutral atoms from the Moon // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. № 12. L12104. P. 1–4.
- McKay D.S., Fruland R.M., Heiken G.H. Grain size and evolution of lunar soils // *Proc. Lunar Sci. Conf. 5th*. 1974. P. 887–906.
- O'Brien B.J. Direct active measurements of movements of lunar dust: rocket exhausts and natural effects contaminating and cleaning Apollo hardware on the Moon in 1969 // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L09201. P. 1–5.

- O'Brien B.J.* Review of measurements of dust movements on the Moon during Apollo // *Planet. and Space Sci.* 2011. V. 59. P. 1708–1726.
- Peterson W.K., Shelley E.G.* Origin of the plasma in a cross-polar cap auroral feature (theta aurora) // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89(A8). P. 6729–6736.
- Pieters C.M., Fischer E.M., Rode O., Basu A.* Optical effects of space weathering: The role of the finest fraction // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98 (E11). P. 20817–20824.
- Popel S.I., Kopnin S.I., Golub' A.P., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Izvekova Yu.N.* Dusty plasma at the surface of the Moon // *Sol. Syst. Res.* 2013. V. 47. P. 419–429.
- Poppe A., Horányi M.* Simulations of the photoelectron sheath and dust levitation on the lunar surface // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A08106. P. 1–9.
- Rennilson J.J., Criswell D.R.* Surveyor observations of lunar horizon-glow // *The Moon.* 1974. V. 10. P. 121–142.
- Saito Y., Yokota S., Tanaka T., Asamura K., Nishino M.N., Fujimoto M., Tsunakawa H., Shibuya H., Matsushima M., Shimizu H., Takahashi F., Mukai T., Terasawa T.* Solar wind proton reflection at the lunar surface: Low energy ion measurement by MAP-PACE onboard SELENE (KAGUYA) // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 24. L24205. P. 1–6.
- Schwenn R., Marsch E.* Physics of the inner heliosphere 1: Large-scale phenomena // *Phys. Chem. Space V.* 20. Springer Science & Business Media, 2012. 281 p.
- Stubbs T., Halekas J., Farrell W., Vondrak R.* Lunar Surface Charging: A Global Perspective Using Lunar Prospector Data // *Dust in Planetary Systems.* 2007. ESA SP-643. P. 181–184.
- Stubbs T.J., Farrell W.M., Halekas J.S., Burchill J.K., Collier M.R., Zimmerman M.I., Vondrak R.R., Delory G.T., Pfaff R.F.* Dependence of lunar surface charging on solar wind plasma conditions and solar irradiation // *Planet. and Space Sci.* 2014. V. 90. P. 10–27.
- Taylor S.R.* Planetary Science: A Lunar Perspective. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1982. 481 p.
- Taylor G.J., Warren P., Ryder G., Delan J., Pieters C., Lofgren G.* Lunar Rocks // *Lunar source book: A user's guide to the Moon.* Cambridge Univ. Press, 1991. P. 183–284.
- Wieser M., Barabash S., Futaana Y., Holmström M., Bhardwaj A., Sridharan R., Dhanya M.B., Wurz P., Schaufelberger A., Asamura K.* Extremely high reflection of solar wind protons as neutral hydrogen atoms from regolith in space // *Planet. and Space Sci.* 2009. V. 57. P. 14–15.
- Wurz P., Rohner U., Whitby J.A., Kolb C., Lammer H., Dobnikar P., Martín-Fernández J.A.* The lunar exosphere: The sputtering contribution // *Icarus.* 2007. V. 191. № 2. P. 486–496.
- Zook H.A., McCoy J.E.* Large scale lunar horizon glow and a high altitude lunar dust exosphere // *Geophys. Res. Lett.* V. 18. No 11. 1991. P. 2117–2120.
- Zook H., Potter A., Cooper Bonnie.* The Lunar Dust Exosphere and Clementine Lunar Horizon Glow // 26th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1995. P. 1577.