

УДК 523

ПРИБОР МЕТЕОР-Л НА ЛУННОМ ОРБИТАЛЬНОМ АППАРАТЕ ЛУНА-26: ДЕТЕКТОР КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ

© 2021 г. Е. Н. Слюта^a, *, В. В. Высочкин^a, В. В. Иванов^a, В. Ю. Маковчук^a, А. И. Назаров^a,
В. И. Погонин^a, Е. А. Роскина^a, В. В. Сафронов^a, Л. П. Таций^a

^aИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*e-mail: slyuta@geokhi.ru

Поступила в редакцию 11.03.2021 г.

После доработки 13.05.2021 г.

Принята к публикации 19.06.2021 г.

Детектор космической пыли ионизационного типа МЕТЕОР-Л разрабатывается для лунного орбитального аппарата Луна-26 и предназначен для изучения распределения в пространстве метеорных тел по массе и скорости, и долговременного мониторинга динамичной эволюции пылевой компоненты в лунной экзосфере. Последние исследования облаков пыли вокруг Луны показывают тесную взаимосвязь постоянной и динамичной эволюции компонентов лунной экзосферы, геологической истории образования лунного реголита, процессов образования и накопления летучих компонентов в лунном реголите с постоянным воздействием таких компонентов межпланетной среды, как межпланетная пыль преимущественно кометного происхождения и метеороиды из пояса астероидов. Детектор космической пыли способен регистрировать метеорные частицы размером 0.1–3 мкм с массой 10^{-14} – 10^{-9} г и скоростью от 3 до 35 км с⁻¹. Испытания и калибровка на ускорителе частиц подтвердили заявленные функциональные возможности детектора для регистрации частиц космической пыли с параметрами, характерными для лунной экзосферы.

Ключевые слова: Луна, лунная экзосфера, межпланетная пыль, метеорный поток, метеороиды, метеоритная бомбардировка, детектор космической пыли, лунный реголит

DOI: 10.31857/S0320930X21050042

ВВЕДЕНИЕ

Межпланетная пыль является одним из компонентов межпланетной среды, концентрируется в основном в плоскости эклиптики Солнечной системы с наклоном орбит в пределах 30°–40° и движется преимущественно по эллиптическим орбитам в направлении вращения Солнца и обращения вокруг него планет. При удалении от Солнца плотность пылевого облака падает, простираясь, вероятно, до орбиты Юпитера. Облака пыли рассеивают свет в видимом диапазоне, образуя зодиакальный свет, и излучают в среднем и дальнем ИК-диапазонах (Yang, Ishiguro, 2015). Исследование распределения и состава метеорных тел с массами примерно больше 10^{-5} г осуществляется с помощью наземных оптических методов в различных диапазонах спектра и радиолокационными методами (Kelsall и др., 1998; Ishiguro и др., 2013). Информацию о пылевых частицах меньшей массы, примерно, до 10^{-15} г, для различных областей межпланетного пространства дают измерения с борта космических аппаратов (КА). Низкая статистическая обеспеченность данных измерений на КА обусловлена ма-

лой пространственной плотностью метеорного вещества и небольшими площадями чувствительных поверхностей датчиков, что может быть компенсировано количеством экспериментов и их продолжительностью. Предыдущие эксперименты на межпланетных станциях по изучению метеорного вещества давали возможность получать усредненные данные о пространственном распределении метеорных тел, а данные по распределению тел по массам получали из пересчета регистрируемых энергетических характеристик (импульс или кинетическая энергия падающей частицы) при заданных значениях ударной скорости (20 км с⁻¹) и плотности метеорной частицы (3 г см⁻³), принятых по рекомендации КОСПАР в 1967 г. для возможности сопоставления экспериментальных данных, полученных различными авторами (Назарова, 1973).

Взаимное столкновение частиц, планетное возмущение орбит пылевых поясов и воздействие эффекта Пойнтинга–Робертсона на пылевые частицы приводят к выпадению частиц на Солнце и к постепенной деградации пылевых облаков. В зависимости от размера облака и его орбиты

Таблица 1. Основные метеорные рои*

№ п/п	Название русское	Название латинское	Эпоха активности	Дата максимума	Радант, град	Скорость, км/с	Комета- источник
Дневные потоки							
1	Квандратиды	Quadrantids	3.I	3.I	251 + 50	41	1861 Галлея? Понса–Виннеке
2	Лириды	Lyrids	20–22.IV	21. IV	270 + 33	48	
3	δ-Аквариды	δ-Aquarids	1–11.V	5.V	337 – 1	66	
4	Июньские Дракониды	June Draconids	28.VI	28.VI	208 + 54	–	
5	η-Аквариды	η-Aquarids	24.VII–6.VIII	30.VII	340 – 15	41	Галлея
6	Персеиды	Perseids	27.VII	17.VIII	12.VIII	46 + 58	Свифта–Тутля
7	Октябрьские Дракониды	October Darconids	9.X	9.X	262 + 54	23	Джакобини– Циннера
8	Ориониды	Orionids	15–25.X	20.X	94 + 16	66	Галлея
9	Тауриды	Taurids	26.X–16.XI	31.X	52 ± 21	31	Энке
10	Андромедиды	Andromedids	14.XI	14.XI	23 + 44	16	Биелы
11	Леониды	Leonids	15–29.XI	16.XI	152 + 22	72	Темпеля–Тутля
12	Геминиды	Geminids	9–13.XII	12.XII	113 + 32	35	1964VIII
13	Урсиды	Ursids	21–22.XII	22.XII	206 + 80	35	Тутля
Ночные потоки							
14	о-Цетиды	о-Cetids	13–23.V	15.V	30 – 3	37	–
15	ζ-Персеиды	ζ-Perseids	1–16. VI	8.VI	59 + 22	29	Энке
16	Ариетиды	Arietids	30.V–18.VI	8.VI	44 + 23	38	Энке
17	β-Тауриды	β-Taurids	25.VI–7.VII	29. VI	85 + 17	31	

* (Слюта и др., 1995).

время его деградации и полного разрушения оценивается в пределах 10^3 – 10^7 лет, что несоизмеримо мало по сравнению с возрастом Солнечной системы (Yang, Ishiguro, 2015). В пределах земной орбиты скорость разрушения пылевых облаков оценивается величиной примерно 10^3 кг с⁻¹ (Grun и др., 1985; Mann, Chechowski, 2005). Столкновительная эволюция малых тел Солнечной системы (астероидов и комет), газопылевая сублимация с поверхности комет с образованием протяженных газопылевых хвостов при приближении комет к Солнцу, а также метеоритная и микрометеоритная бомбардировка планетных тел, их спутников и малых тел являются постоянным и неисчерпаемым источником межпланетной пыли. Среди комет в качестве основных источников выделяются кометы семейства Юпитера, вклад которых, например, в метеорный поток в атмосфере Земли оценивается в $80 \pm 17\%$ от общей массы всех падающих метеорных частиц, которая оценивается в 43 ± 14 тонны в сутки (Carrillo-Sánchez и др., 2016). Остальное приходится на кометы типа Галлея из других семейств планет-гигантов (Сатурна, Урана, Нептуна), на кометы из Облака Оорта и астероиды.

Пылевые облака, сформированные хвостами комет, очень протяженные и могут достигать нескольких миллионов километров. Они движутся по стабильным эллиптическим орбитам, и система Земля–Луна, как правило, пересекает такие пылевые облака в одни и те же даты, когда в атмосфере Земли на высоте 60–120 км наблюдаются потоки метеоров (метеорные рои). Международным астрономическим Союзом (IAU) зарегистрировано 40 ежегодных метеорных потоков, наблюдаемых на Земле и, соответственно, сталкивающихся с системой Земля–Луна (Jopeka, Kaňuchová, 2017). Среди них обычно выделяется около 20 главных метеорных роев, с каждым из которых ассоциируется определенная комета (табл. 1). По составу около 90% метеорных частиц относится к углистым хондритам (Yang, Ishiguro, 2015), тогда как среди метеоритов около 80% имеют состав обыкновенных хондритов, которые представляют в основном оптический класс S-астероидов.

Гелиоцентрическая скорость пылевых облаков на расстоянии 1 а. е. от Солнца не превышает 42 км с⁻¹, а их плотность составляет около 10^{-16} г м⁻³ (Grun и др., 1985). Большая часть этой массы представлена частицами от 10^{-6} до 10^{-4} г. Время жизни частиц массой от 10^{-4} до 1 г из-за взаимных

столкновений является самым коротким и составляет около 10^4 лет. В результате этих столкновений частиц среднего размера с массой $10^{-10} \lesssim m \lesssim 10^{-5}$ г создается больше, чем разрушается. Скорость образования частиц среднего размера оказывается примерно в 16 раз больше, чем скорость их потерь в зоне земной орбиты из-за эффекта Пойнтинга–Робертсона, которая составляет всего около 0.26 т с^{-1} (Grun и др., 1985). Основные потери пылевого облака в зоне питания Земли происходят за счет частиц с массой $m \lesssim 10^{-10}$ г, которые удаляются по гиперболическим траекториям давлением излучения.

Пылевые оболочки также были обнаружены вокруг Земли и Луны (Гулак, 1983; Барсуков, Назарова, 1983). Ежегодно на Луну выпадает около 10^6 кг микрометеороидов кометного и астероидного происхождения со скоростью от 10 до 72 км с^{-1} (Grun и др., 2011). Большинство этих частиц имеют размер от 10 нм до 1 мм. Во время удара они выбивают с поверхности Луны примерно в 1000 раз больше вещества, чем их собственная масса. При этом основная часть вещества возвращается на поверхность Луны и продолжает формировать рыхлый слой лунного реголита, скорость образования которого мала и оценивается примерно в 1.5 мм за 1 млн лет (French, 1977). Пылевые частицы, которые при ударе выбрасываются с поверхности со скоростью 2300 м с^{-1} и более образуют постоянное облако пыли из вторичных частиц вокруг Луны, которые периодически также выпадают на лунную поверхность. Следует отметить, что распределение размеров вторичных частиц в выбросах соответствует распределению частиц тонкозернистой фракции лунного реголита, поскольку большинство вторичных частиц снова выпадают на поверхность, становясь частью реголита. Аналогичные пылевые облака наблюдались на космическом аппарате Galileo вокруг галилеевых спутников Юпитера (Thiessenhusen и др., 2000; Krivov и др., 2002a; 2002b), в которых распределение частиц по массе оказалось близким к распределению частиц вокруг Луны (Hogányi и др., 2015).

Впервые метеорный эксперимент с аппаратурой ионизационного типа был проведен на искусственном спутнике Земли HEOS-2 (Highly Eccentric Orbit Satellite) в 1972–1974 гг. (Fecting и др., 1979). Попытка исследования облаков пыли в окололунном пространстве с помощью мюнхенского детектора пыли на орбитальном КА HITEN с 15 февраля 1992 г. по 10 апреля 1993 г. оказалась не совсем удачной из-за низкой чувствительности прибора и удаленности лунной орбиты (Iglseider и др., 1996). Ударно-ионизационный детектор пыли LDEX (Lunar Dust Experiment), установленный на борту КА LADEE (Lunar Atmosphere and

Dust Environment Explorer) за 80 дней измерений с октября 2013 по апрель 2014 гг. на высоте 20–260 км зарегистрировал около 140000 попаданий частиц (Hogányi и др., 2015). LDEX измерял заряды положительных и отрицательных осколков плазменного облака, образующегося при ударе частицы пыли о мишень детектора (Hogányi и др., 2014). Масса частицы определялась по амплитуде и длительности фронтов зарядовых сигналов. Рабочая площадь детектора составляла 0.01 м^2 с угловой апертурой $\pm 68^\circ$. Космический аппарат LADEE двигался по приэкваториальной ретроградной орбите с характерной орбитальной скоростью 1.6 км с^{-1} (Elphic и др., 2014).

В отличие от пылевых облаков вокруг галилеевых спутников Юпитера, которые характеризуются симметричным и однородным распределением из-за перемешивания мощным гравитационным полем Юпитера, плотность пылевых облаков вокруг Луны характеризуется значительной асимметрией (рис. 1). Предполагается, что это связано с пространственной анизотропией облаков межпланетной пыли, формирующих выбросы вторичных частиц с лунной поверхности. Максимальная плотность наблюдается вблизи утреннего терминатора, а минимальная — вблизи вечернего. В детекторе LDEX рост частоты попаданий устойчиво регистрировался при пересечении нескольких главных ежегодных метеорных потоков. Самый сильный рост наблюдался во время прохождения системы Земля–Луна метеорным потоком Геминиды (Hogányi и др., 2015). Таким образом, метеорные потоки скоростных частиц кометного происхождения с более высокой энергией удара, по сравнению с медленными частицами астероидного происхождения, производят основное количество облаков вторичных частиц, выброшенных при ударе с поверхности Луны.

Появление воды в лунной экзосфере на высоте 20–100 км также тесно связано с выбросами вторичных частиц с лунной поверхности при ударе. Повышение содержания нейтральных молекул воды (включая гидроксилы OH) регистрировалось нейтральным масс-спектрометром NMS (Neutral Mass Spectrometer) на борту КА LADEE при бомбардировке лунной поверхности спорадическими фоновыми метеорными потоками, микрометеоритами и крупными отдельными метеороидами (Venna и др., 2019). Предполагается, что источниками этой воды могут быть как сами частицы метеорных потоков, поскольку некоторые углистые хондриты могут содержать до 20% гидратной воды, так и остатки молекулярной воды и водяного льда, накопленных в лунном реголите. В результате ударно-взрывной переработки реголита, по-видимому, примерно 67% молекул воды покидает спутник Земли из-за высокой ско-

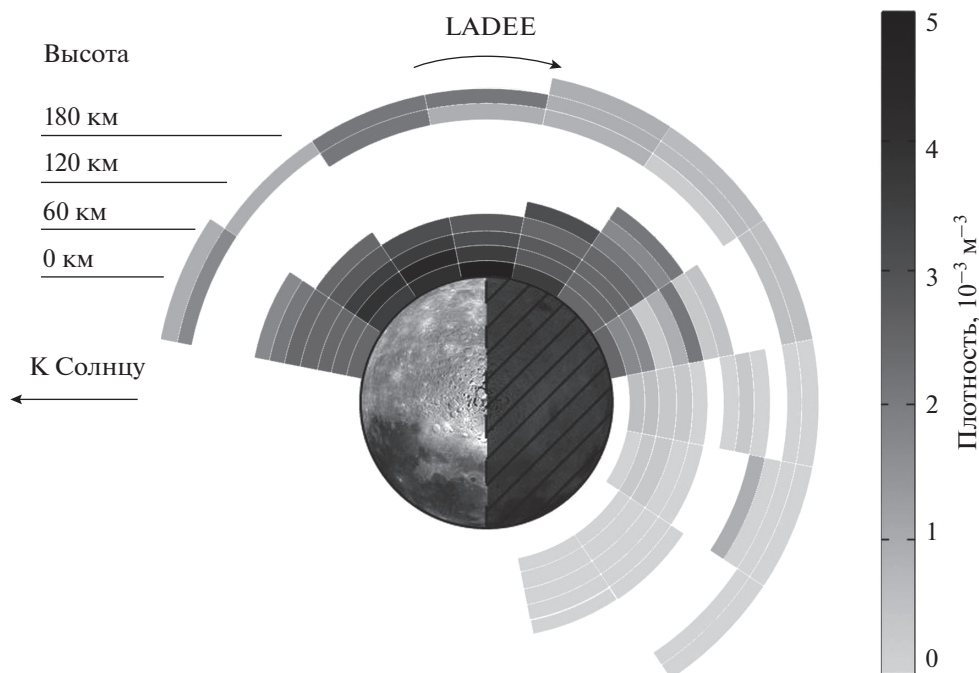


Рис. 1. Распределение плотности пылевых облаков вокруг Луны в экваториальной плоскости (Hogányi и др., 2015). Белым цветом показаны сектора, в которых измерения не проводились. Максимальная плотность наблюдается вблизи утреннего терминатора.

рости и теряется, а остальные 33% переотлагаются и захораниваются в реголите после латерального перемещения в экзосфере (Venpa и др., 2019). В целом скорость потери воды в результате микрометеоритной и метеоритной бомбардировки лунной поверхности оценивается в $3.4\text{--}8.1 \text{ г с}^{-1}$. Для сравнения, скорость образования протонной воды под ионизирующим воздействием солнечного ветра на минеральные частицы лунного реголита оценивается в 2.0 г с^{-1} (Housley и др., 1973; Arnold, 1979; Slyuta и др., 2017). На основе оценки баланса потерь и поступления из разных источников воды предполагается, что в настоящее время на поверхности всей Луны и особенно в постоянно затененных районах в полярных областях доминирует режим потери воды из-за микрометеоритной и метеоритной бомбардировки (Venpa и др., 2019). Для того, чтобы обеспечить такие потери воды в масштабе геологического времени, по-видимому, основные запасы воды (водяного льда) в лунном реголите должны были сформироваться очень давно, возможно в Нектарскую (>3.8 млрд лет) или даже в Донекарскую (>4.0 млрд лет) эпоху.

Последние исследования облаков пыли вокруг Луны показывают удивительно тесную взаимосвязь постоянной и динамичной эволюции компонентов лунной экзосферы, геологической истории образования лунного реголита, процессов образования и накопления летучих компонентов

в лунном реголите с постоянным воздействием таких компонентов межпланетной среды, как межпланетная пыль преимущественно кометного происхождения и метеороиды из пояса астероидов. Очевидно, что изучение пылевых облаков в системе Земля–Луна и вокруг Луны решает не только практическую проблему обеспечения метеороидной безопасности лунных орбитальных и посадочных аппаратов, но и важную фундаментальную научную проблему, актуальность и значимость которой на современном этапе исследования и освоения Луны является несомненной.

НАЗНАЧЕНИЕ И СОСТАВ ПРИБОРА МЕТЕОР-Л

Детектор космической пыли МЕТЕОР-Л устанавливается на лунный орбитальный аппарат Луна-26 и предназначен для изучения распределения метеорных тел по массе, скорости и для контроля метеорной обстановки на трассе Земля–Луна и вокруг Луны. Ось прибора, который располагается на фронтальной передней платформе КА, должна быть направлена по вектору движения космического аппарата, и поле зрения прибора ($\sim 120^\circ$) не должно перекрываться элементами конструкции аппарата или другими научными приборами. Указанное расположение детектора космической пыли на КА является оптимальным для выполнения научной задачи на трассе Земля–Луна и на лунной орбите.

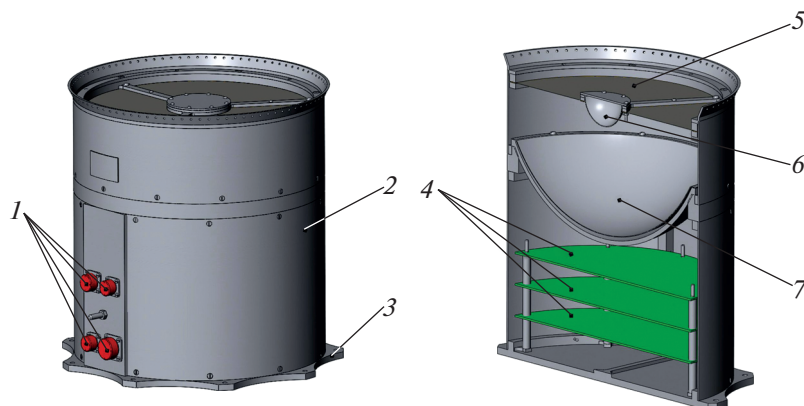


Рис. 2. Общий вид прибора МЕТЕОР-Л с открытым детектором частиц. 1 — разъемы для подключения прибора; 2 — корпус прибора; 3 — фланец крепления прибора к носителю; 4 — платы блока электроники; 5 — экранная сетка; 6 — коллектор детектора; 7 — мишень-преграда детектора.

Детектор космической пыли МЕТЕОР-Л состоит из двух основных блоков, — блока детектора (БД) и блока электроники (БЭ). Блок детектора предназначен для регистрации зарядов плазменного облака, образующегося при соударении метеорных частиц с мишенью-преградой детектора. Активная площадь детектора составляет 0.054 м^2 . Блок детектора открыт в космическое пространство (рис. 2) и защищен экранной сеткой, апертура детектора составляет 120° . Блок электроники производит анализ сигналов с детектора, их обработку, запоминание и вывод данных на телеметрическую систему при опросе аппаратуры. Конструктивно прибор выполнен единым блоком (рис. 3). Прибор размещается на термоплатформе КА, которая обеспечивает необходимый температурный режим для надежной работы БЭ.

Принцип действия аппаратуры основан на явлении ионизации вещества высокоскоростной частицы при ее взаимодействии с преградой (рис. 4). Облако плазмы, образовавшееся в результате испарения и ионизации материала метеорной частицы и части материала мишени, попадает в электростатическое разделительное поле между коллектором ионов и мишенью, являющейся одновременно и коллектором электронов. С коллекторов сигналы поступают на входы зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ). Полученные сигналы усиливаются и поступают в амплитудно-временной анализатор блока электроники для последующей обработки.

Датчик ионизационного типа позволяет регистрировать метеорные частицы в диапазоне скоростей $3\text{--}35 \text{ км с}^{-1}$ с массой $3 \times 10^{-15}\text{--}10^{-9} \text{ г}$. Для получения данных по физико-динамическим параметрам падающей частицы фиксируется суммарный заряд ионов (Q^+), образованных при ударе, и скорость нарастания фронта заряда (t). Образованный ионный заряд пропорционален

скорости частицы ($Q^+ \sim V^{3-32}$), скорость нарастания фронта заряда пропорциональна скорости частицы ($t \sim V^{0.8}$). Определяемые параметры метеорных частиц — масса (m) и скорость (V) — и регистрируемые параметры электрических сигналов (Q , t) связаны соотношениями:

$$Q = kmV^{3.2}; \quad t = V^\alpha, \quad (1)$$

где k , α — коэффициенты, зависящие от геометрии и конструктивного решения детектора аппаратуры. Значения коэффициентов определяются по результатам модельных экспериментов на ускорителе микрочастиц при отработке аппаратуры и ее калибровке.

Поскольку масса метеорной частицы определяется исходя из измеренного значения суммарного заряда ионов или электронов, то диапазон определяемых масс зависит от величины ударной скорости частицы. Для пылевого окружения Луны скорости вторичных частиц в основном должны быть около 2 км с^{-1} (скорость убегания частиц с поверхности Луны). При такой скорости, как показывают модельные эксперименты на ускорителе частиц, соотношение образованного заряда к массе частицы (Q^+/m) близко к единице, где Q^+ — заряд облака ионов в кулонах, масса частицы m — в килограммах. Этот результат и определяет нижний порог регистрируемых прибором масс частиц у Луны. По этой же причине нецелесообразно в окрестностях Луны использовать масс-спектрометрические приборы с малой площадью мишени, т.к. события, дающие возможность получить масс-спектр материала частицы, будут крайне редки. Основные технические характеристики прибора приведены в табл. 2.



Рис. 3. Общий вид макета прибора МЕТЕОР-Л с защитной крышкой на детекторе.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И РЕЖИМ РАБОТЫ ПРИБОРА

Мишень-преграда детектора (М) и коллектор детектора (К) расположены в блоке детектора, который открыт в космическое пространство (рис. 5). На поверхности мишени-преграды (М), которая является анодом с потенциалом $+350$ В, регистрируется суммарный заряд электронов, а на поверхности коллектора (К) с отрицательным потенциалом -350 В — суммарный заряд ионов, образующихся при высокоскоростном ударе частицы о мишень-преграду. В сильном электрическом поле происходит разделение зарядов ионизационного плазменного облака и их значения независимо регистрируются зарядо-чувствительными усилителями ЗЧУ в усилительно-преобразующем устройстве (УПУ), где сигналы уси-

ливаются и поступают в амплитудно-временные преобразователи (АВП). В АВП происходит измерение максимальных амплитуд сигналов с выходов ЗЧУ, длительности фронтов и аналого-цифровое преобразование. После обработки параметров сигналов в АВП полученная информация поступает в блок управления, сбора и хранения информации (БУС), где хранится до сеанса связи с блоком управления научной информацией (БУНИ). При опросе прибора хранящаяся информация по стандартному интерфейсу RS485 передается в БУНИ. Источник вторичного электропитания (ИВЭП) преобразует напряжение бортового питания 27 В в необходимый для работы прибора набор напряжений. Формирователь калибровочных импульсов (ФКИ) вырабатывает калибровочные сигналы для проверки работоспособно-

сти прибора, которые поступают на входы предусилителей УПУ после каждого сеанса опроса прибора.

В приборе важное значение имеет количество заряда и форма входного сигнала. Выходной сигнал усилителя должен быть пропорционален заряду входного импульса, а форма выходного сигнала должна иметь такой вид, при котором проводится наилучшее исследование входного воздействия. Поэтому УПУ представляет собой интегрирующую секцию зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ) с глубокой емкостной отрицательной обратной связью. Коэффициент преобразования K_{qu} заряда $Q_{вх}$, индуцированного импульсами тока детектора во входную цепь усилителя, в импульсы напряжения $U_{всх}$ на его выходе описывается уравнением:

$$K_{qu} = U_{всх} / Q_{вх} = -1 / C_{ос}, \quad (2)$$

где $C_{ос}$ — емкость обратной связи ЗЧУ. Постоянная времени интегрирования τ зависит от цепи обратной связи RC, для этого входной каскад ЗЧУ выбран с большим входным сопротивлением и большим собственным коэффициентом усиления (без обратной связи).

$$\tau = R_{ос} C_{ос}. \quad (3)$$

Усилительная часть прибора представляет несколько ЗЧУ, которые отличаются емкостями обратной связи, резисторами обратной связи и наличием масштабных усилителей. Это позволит снять и преобразовать сигналы с детекторов в широком диапазоне входных зарядов. Масштабные усилители преобразуют сигналы в выходные напряжения нужной амплитуды и полярности. ЗЧУ каждого из датчиков имеет вполне определенные параметры цепи обратной связи.

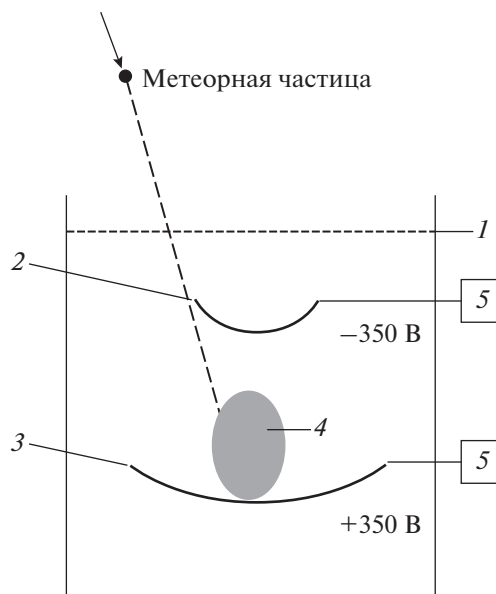


Рис. 4. Физическая схема работы детектора космической пыли ионизационного типа: 1 — экранная сетка; 2 — коллектор ионов; 3 — мишень-преграда; 4 — облако плазмы; 5 — зарядо-чувствительные усилители ЗЧУ.

Так как прибор регистрирует суммарный заряд ионов, образованных при высокоскоростном ударе, нижняя граница поля регистрации определяется нижним порогом регистрации заряда входного каскада зарядочувствительного усилителя. Существование конечного порога чувствительности, обусловленного шумом усилителя, ограничивает снизу диапазон значений входных зарядов $Q_{вх}$, которые могут быть преобразованы усилителем-формирователем. Порог чувствительности ЗЧУ секции определяется, главным образом,

Таблица 2. Технические характеристики прибора МЕТЕОР-Л

Параметр	Масса, скорость метеорных частиц
Скорость метеорных частиц, км с ⁻¹	3–35
Масса метеорных частиц, г	10 ⁻¹⁴ –10 ⁻⁹
Точность измерений:	30%
Масса частиц —	10% — в диапазоне 3–10 км с ⁻¹
Скорость частиц —	30% — в диапазоне 11–35 км с ⁻¹
Чувствительная площадь детектора, см ²	540
Поле зрения прибора, град	120
Масса прибора, кг	3.5 ± 0.35
Габариты прибора, мм	Ø 252 × 380
Напряжение питания	28.5 ± 1.35
Энергопотребление, Вт	5.5
Информативность, кбайт/сеанс	4

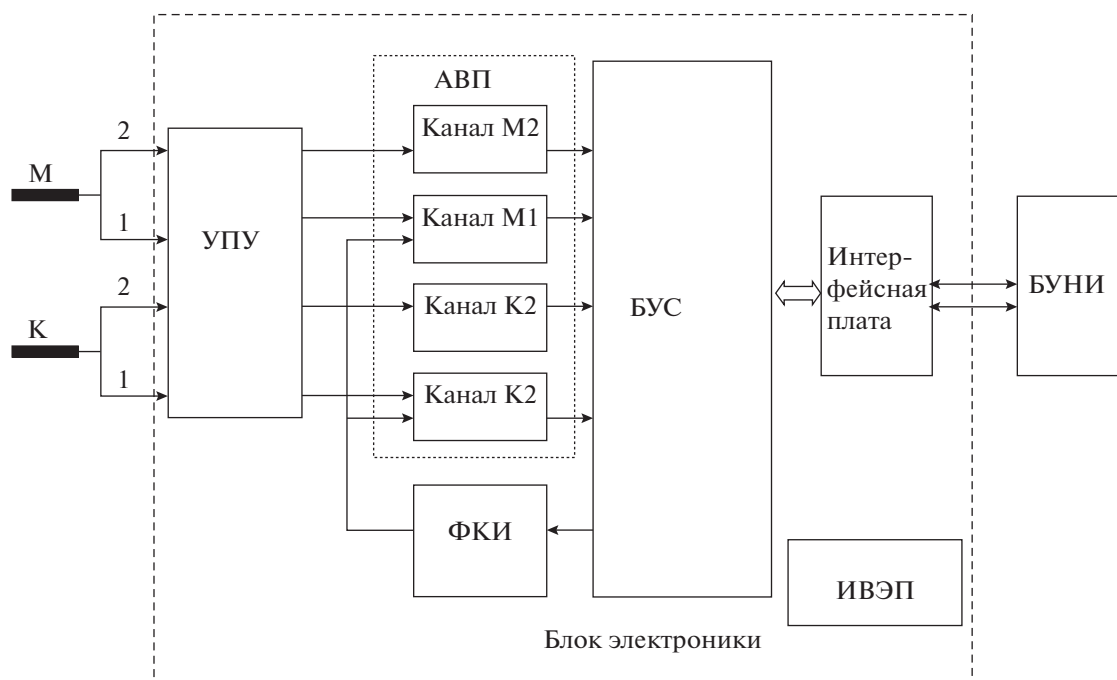


Рис. 5. Структурная схема блока электроники прибора МЕТЕОР-Л. Расшифровка обозначений приведена в тексте.

типом головного элемента. Как правило, в этих секциях используют полевые транзисторы, что обеспечивает шумовой заряд порядка 1×10^{-15} К. В зависимости от требований по обработке сигналов с усилителей-формирователей, выходные сигналы с ЗЧУ могут быть преобразованы масштабными усилителями в сигналы нужной амплитуды и полярности.

Прибор включается через 3–4 ч после сброса обтекателя и работает в непрерывном режиме не менее расчетного срока эксплуатации прибора, равного 8000 ч. Расчетная вероятность безотказной работы прибора МЕТЕОР-Л за время экспедиции составляет 0.965, а вероятность безотказной работы за время работы по штатной циклограмме — 0.974.

КАЛИБРОВКА ПРИБОРА

При разработке прибора МЕТЕОР-Л наибольшей сложностью представил процесс имитации высокоскоростного взаимодействия метеорной частицы с поверхностью мишени-преграды прибора, необходимый для отработки конструкции детектора прибора и последующей его калибровки. Технические характеристики прибора являются расчетными. Так как прибор регистрирует суммарный заряд ионов, образованных при высокоскоростном ударе, нижняя граница поля регистрации определена нижним порогом регистрации заряда входного каскада зарядочувствительного усилителя. Пока не существует стенда,

который позволил бы полностью имитировать весь наблюдаемый диапазон скорости и массы природных метеорных частиц. Наиболее целесообразным методом ускорения микрочастиц для калибровки прибора является электростатический метод (Акишин, Кирюхин, 1970).

Конечная скорость частицы V (км), которую она приобретает, пройдя разность потенциалов U (В) в ускорительной трубке, равна:

$$V = \sqrt{2Uq/m}, \quad (4)$$

где m и q — масса частицы (кг) и приобретенный заряд (Кл) соответственно. Наиболее ответственным узлом ускорительной системы является инжектор заряженных частиц (Акишин и др., 1983), в котором происходит зарядка микрочастиц контактным способом на сферическом электроде, и конструкция которого предотвращает загрязнение металлической пылью внутреннего вакуумного объема трубки основного ускорителя. В качестве микрочастиц использовался мелкодисперсный алюминиевый порошок с размером частиц 0.1–3.0 мкм. При напряжении ~1500 кВ, приложенном к ускоряющей трубке ускорителя, частицы приобретали скорости в диапазоне 5–35 км с⁻¹.

Калибровка прибора проводилась на стенде КГ-500 (каскадный генератор) в НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ. При проведении испытаний и калибровке детектора прибора на выходе ускоряющей трубки в дрейфовом пространстве были установлены два индукцион-

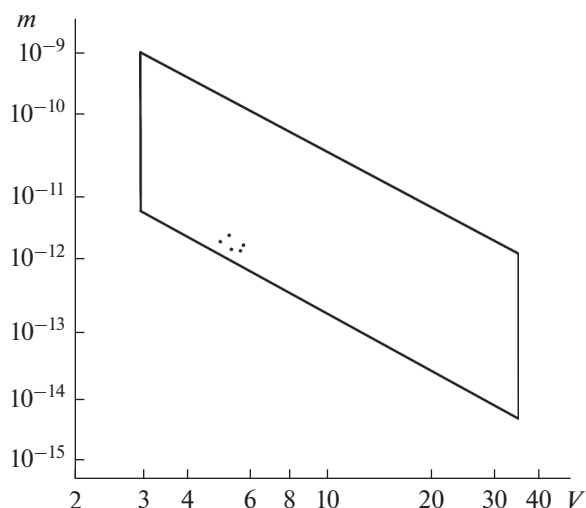


Рис. 6. Поле регистрации прибора МЕТЕОР-Л, где m — масса частицы в граммах, v — скорость частицы км с⁻¹. Точками показаны результаты калибровки прибора на ускорителе частиц.

ных датчика, фиксирующих заряд пролетающей частицы, сигнал с которых через зарядочувствительные усилители подавались на вход запоминающего осциллографа. При известном расстоянии между датчиками определялась скорость пролетающей частицы с точностью не хуже 8%. Скорость является единственным регистрируемым параметром, остальные параметры вычисляются исходя из величины зарегистрированного заряда, при этом длительность фронта его нарастания сопоставляется с зарегистрированной скоростью. Сигнал с нижнего индукционного кольца служил также для запуска временной развертки запоминающего осциллографа, регистрировавшего электрические сигналы с мишени-преграды и коллектора детектора прибора для дальнейшей их обработки и получения эмпирической зависимости между регистрируемыми электрическими сигналами и физико-динамическими параметрами падающей частицы. Проведенные на ускорителе частиц сеансы отработки конструкции детекторной части прибора подтвердили целесообразность выбранной геометрии и конструкции детекторной части прибора (рис. 6). Экспериментальные исследования по отработке и калибровке прибора продолжаются, в том числе и для разработки прибора следующего поколения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН в лаборатории геохимии Луны и планет создан детектор космической пыли МЕТЕОР-Л для исследования распределения пылевых облаков вокруг Луны, а также для

оценки метеорной опасности для полетов космических аппаратов на трассе Земля—Луна и в окололунном пространстве. Прибор включен в состав комплекса научной аппаратуры лунного орбитального аппарата Луна-26, запуск которого планируется в 2024 г. Детектор космической пыли способен регистрировать метеорные частицы размером 0.1–3 мкм, с массой 10^{-14} – 10^{-9} г и скоростью от 3 до 35 км с⁻¹. Испытания и калибровка на ускорителе частиц подтвердили заявленные функциональные возможности детектора для регистрации частиц космической пыли с параметрами, характерными для лунной экзосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акишин А.И., Кирюхин В.П. Ускорение макрочастиц на электростатическом ускорителе // П.Т.Э. 1970. № 6. С. 141–152.
- Акишин А.И., Кирюхин В.П., Новиков Л.С. Имитация воздействия потоков микрометеоритов и пыли планетарного происхождения на материалы КА // Модель космического пространства / Ред. Вернов С.Н. М.: Изд. Московского университета, 1983. Т. 2. С. 310–322.
- Барсуков В.Л., Назарова Т.Н. К вопросу о пылевой оболочке Земли // Астрон. вестн. 1983. Т. 17(4). С. 238–243.
- Гулак Ю.К. О возможности образования дискретных пылевых поясов вокруг Земли // Астрон. вестн. 1983. Т. 17(4). С. 232–237.
- Назарова Т.Н. Микрометеоритная материя // Модель космического пространства / Ред. Вернов С.Н. М.: Изд. Московского университета, 1973. С. 137–141.
- Слюта Е.Н., Иванов В.А., Иванов М.А. Сравнительная планетология. Основные понятия, термины и определения. М.: Наука, 1995. 141 с.
- Arnold J.R. Ice in the lunar polar regions // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 5659–5668.
- Benna M., Hurley D.M., Stubbs T.J., Mahaffy P.R., Elphic R.C. Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts // Nature Geoscience. 2019. V. 12. P. 333–338.
- Carrillo-Sánchez J.D., Nesvorný D., Pokorný P., Janches D., Plane J.M.C. Sources of cosmic dust in the Earth's atmosphere // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 11979–11986.
- Elphic R.C. et al. The Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer mission // Space Sci. Rev. 2014. V. 185. P. 3–25.
- Fectig H., Grun E., Morfill G. Micrometeoroids within ten Earth radii // Planet. and Space Sci. 1979. V. 27. P. 511–531.
- French B.M. The Moon book. Penguin Books, Harmondsworth, Middlesex, England, 1977. 287 p.
- Grun E., Zook H.A., Fectig H., Giese R.H. Collisional balance of the meteoritic complex // Icarus. 1985. V. 62(2). P. 244–272.
- Grun E., Horanyi M., Sternovsky Z. The lunar dust environment // Planet. and Space Sci. 2011. V. 59. P. 1672–1680.

- Horanyi M., Sternovsky Z., Lankton M., Dumont C., Gagnard S., Gathright D., Grün E., Hansen D., James D., Kempf S., Lamprecht B., Srama R., Szalay J.R., Wright G.* The Lunar Dust Experiment (LDEX) onboard the Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE) mission // *Space Sci. Rev.* 2014. V. 185. P. 93–113.
- Horányi M., Szalay J.R., Kempf S., Schmidt J., Grün E., Srama R., Sternovsky Z.* A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon // *Nature*. 2015. V. 522. P. 324–326.
- Housley R.M., Grant R.W., Paton N.E.* Origin and characteristics of excess Fe metal in lunar glass welded aggregates // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1973. V. 3. P. 2737–2749.
- Ishiguro M., Yang H., Usui F., Pyo J., Ueno M., Ootsubo T., Minn Kwon S., Mukai T.* High-resolution imaging of the gegenschein and the geometric albedo of interplanetary dust // *Astrophys. J.* 2013. V. 767(75). P. 1–13.
- Iglseder H., Uesugi K., Svedhem H.* Cosmic dust measurements in lunar orbit // *Adv. Space Res.* 1996. V. 17. P. 177–182.
- Joepka T.J., Kaňuchová Z.* IAU Meteor Data Center—the shower database: a status report // *Planet. and Space Sci.* 2017. V. 143. P. 3–6.
- Kelsall T., Weiland J.L., Franz B.A., Reach W.T., Arendt R.G., Dwek E., Freudenreich H.T., Hauser M.G., Moseley S.H., Odegard N.P., Silverberg R.F., Wright E.L.* The COBE diffuse infrared background experiment search for the cosmic infrared background. II. Model of the interplanetary dust cloud // *Astrophys. J.* 1998. V. 508. P. 44–73.
- Krivov A.V., Kruger H., Grün E., Thiessenhusen K.-U., Hamilton D.P.* A tenuous dust ring of Jupiter formed by escaping ejecta from the Galilean satellites // *J. Geophys. Res.* 2002a. V. 107(E1).
- Krivov A.V., Kruger H., Grün E., Thiessenhusen K.-U., Hamilton D.P.* A tenuous dust ring of Jupiter formed by escaping ejecta from the Galilean satellites // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2002b. V. 107. P. 5002.
- Mann I., Czechowski A.* Dust Destruction and Ion Formation in the Inner Solar System // *Astrophys. J. Lett.* 2005. V. 621(1). P. L73–L76.
- Slyuta E.N., Petrov V.S., Yakovlev O.I., Voropaev S.A., Monakhov I.S., Prokofeva T.V.* Application of thermodesorption mass spectrometry for studying proton water formation in the lunar regolith // *Geochemistry International*. 2017. V. 55. № 1. P. 27–37.
- Thiessenhusen K.-U., Kruger H., Spahn F., Grün E.* Dust grains around Jupiter - the observations of the Galileo dust detector // *Icarus*. 2000. V. 144. P. 89–98.
- Yang H., Ishiguro M.* Origin of interplanetary dust through optical properties of zodiacal light // *Astrophys. J.* 2015. V. 813 (87). P. 1–9.