

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.68

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРОТОТИП ПЫЛЕУДАРНОГО МАСС-АНАЛИЗАТОРА
ПИПЛС-А ДЛЯ ПРОЕКТА “ИНТЕРГЕЛИОЗОНД”

© 2019 г. Д. А. Моисеенко*, О. Л. Вайсберг, Д. Н. Глазкин

*Институт космических исследований РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32*

**e-mail: moiseenko-da@yandex.ru*

Поступила в редакцию 19.03.2018 г.

После доработки 19.03.2018 г.

Принята к публикации 15.04.2018 г.

Представлены результаты работ по созданию лабораторного прототипа пылеударного масс-анализатора ПИПЛС-А для проекта “Интергелиозонд”. Прибор предназначен для исследования частиц межпланетной и межзвездной пыли, а также для определения их основных характеристик: массы, компоненты скорости, элементного и изотопного состава. Проведено компьютерное моделирование пылеударного масс-спектрометра, созданы конструкторская модель прибора и рабочее место для испытаний образцов ПИПЛС-А, изготовлен и испытан лабораторный прототип прибора, представлен анализ полученных результатов.

DOI: 10.1134/S0032816218060113

1. ВВЕДЕНИЕ

Космический аппарат (к.а.) “Интергелиозонд” предназначен для изучения внутренней гелиосферы и Солнца с близких расстояний (вплоть до 0.3 а.е.) и отклонением от плоскости эклиптики до 30°. Космический аппарат планируется оснастить научной аппаратурой, нацеленной на изучение параметров солнечной активности, характеристик солнечного ветра, структуры Солнца [1]. Другой немаловажной задачей к.а. является изучение параметров пылевых частиц в гелиосфере, в том числе вне плоскости эклиптики и на сравнительно близких расстояниях от Солнца.

Для решения этой задачи в Институте космических исследований РАН разрабатывается пылевой прибор ПИПЛС-А. Он представляет собой пылеударный масс-анализатор с ионизацией материала ударника за счет высокоскоростного взаимодействия с материалом мишени [2].

Разрабатываемый прибор способен определять следующие характеристики отдельных пылевых частиц: массу, компоненту скорости, элементный и изотопный состав. Проведение этих измерений позволит получить информацию о пространственном распределении частиц пыли вблизи Солнца в плоскости эклиптики и вне ее; определить разнообразие по составу разных популяций частиц; провести анализ и интерпретацию полученных результатов по определению вклада в динамику частиц в солнечной системе от комет, астероидов и межзвездной пыли.

Расчетные характеристики прибора приведены ниже.

Технические характеристики прибора:

- масса ~3.5 кг;
- габариты 310 × 310 × 310 мм;
- энергопотребление 9–10 Вт;
- информативность 0.1–10 Мбит/сут в зависимости от потока.

Аналитические характеристики:

- измеряемые параметры: масса, скорость, заряд (оценка), поток;
- элементный состав;
- диапазон масс 10^{-16} – 10^{-6} г;
- диапазон скоростей 3–100 км/с;
- массовое разрешение спектрометра $M/\Delta M > 30$;
- чувствительная площадь 110 см²;
- поле зрения 45°.

2. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРИБОРА И ПРИНЦИП ЕГО РАБОТЫ

Прибор представляет собой моноблок, включающий в себя детектор влета, мишень-ионизатор, времяпролетную систему, модуль электроники. Структура прибора показана на рис. 1.

Детектор влета 1 определяет время попадания частицы в прибор и измеряет электрический заряд частицы. На мишень-ионизаторе 5 происходит разрушение частицы, сопровождающееся об-

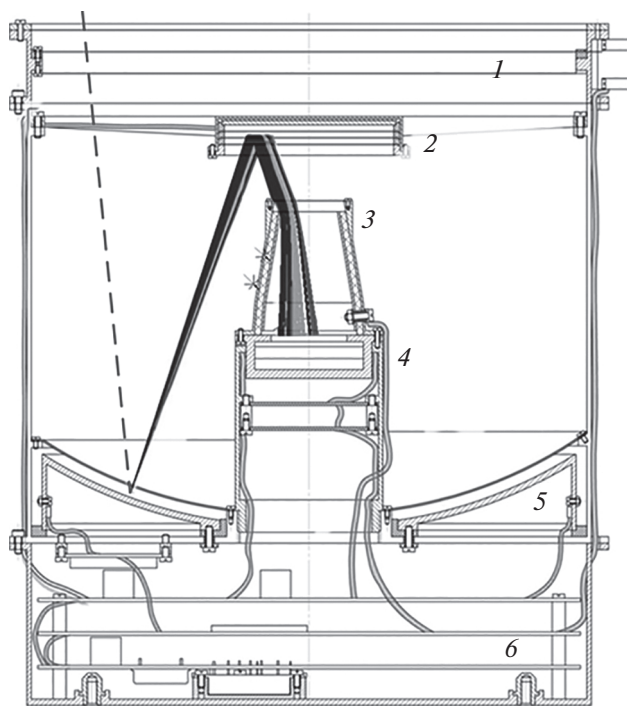


Рис. 1. Структура прибора ПИПЛС-А. 1 – детектор влета; 2 – рефлектрон; 3 – корректирующая линза; 4 – детектор на основе микроканальных пластин; 5 – мишень-ионизатор; 6 – модуль электроники. Показана траектория движения пылевой частицы и ионов, образовавшихся в результате взаимодействия частицы с мишенью-ионизатором.

разованием ионного облака, детектируется время удара, используемое для оценки скорости движения частицы и служащее стартовым импульсом для времяпролетной схемы, определяется масса частицы. Рефлектрон 2 предназначен для синхронизации времени пролета ионов, линза 3 – для коррекции пучка ионов, детектор 4 – для регистрации потока и массового состава ионов.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ И ОЦЕНКА ИХ МАССЫ

Прибор в представленной конфигурации позволяет определить вертикальную составляющую вектора скорости пылинки по интервалу времени между ее прохождением через детектор влета и ударом частицы о мишень. Детектор влета представляет собой систему из трех сеток, две из которых заземлены, а третья подключена к зарядочувствительному усилителю. Прототип системы детектирования пролета пылевых частиц – детектор траекторий для проекта DuneXpress [3]. Структура детектора влета показана на рис. 2.

Все пылевые частицы несут электрический заряд, образовавшийся в результате взаимодей-

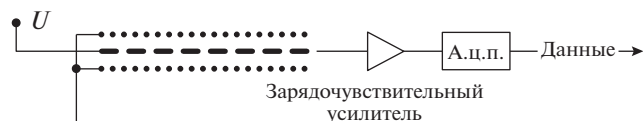


Рис. 2. Схема детектора пролета.

ствия солнечного ветра с их поверхностью [4]. Движение заряженной частицы в детекторе пролета индуцирует ток на сигнальной сетке детектора влета.

При взаимодействии пылевой частицы с мишенью-ионизатором на высоких скоростях образуется плазменное облако из материала частицы и материала мишени. Это облако уносит заряд $Q \sim mv^3$, где Q – регистрируемый заряд, m – масса частицы, v – ее скорость [5]. Соответственно на мишени образуется заряд противоположного знака, что позволяет определить ее массу.

По задержке между появлениями сигналов на детекторе влета и мишени-ионизаторе оценивается составляющая вектора скорости движения частицы. Возможно изменение структуры прибора с целью определения полного вектора скорости, однако это повлечет усложнение конструкции и увеличение веса, что в рамках проекта “Интергелиозонд” достаточно критично.

Для регистрации заряда, сообщенного мишенью-ионизатору, используется зарядочувствительный усилитель с аналого-цифровым преобразователем АЦП. В рамках создания лабораторного прототипа прибора был разработан узел для определения заряда, сообщенного мишени, проведены его предварительные испытания, показана работоспособность предлагаемой схемы. Ведутся работы по калибровке измерительной части данного узла. Пример сигнала, регистрируемого с мишени, приведен на рис. 3. Удар частицы по мишени моделировался при помощи импульсного лазера.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

При взаимодействии мишени-ионизатора с пылевыми частицами на скоростях выше 3 км/с происходит практически полная ионизация материала частицы и частичная ионизация материала, выбиваемого из мишени. Образовавшееся при таком взаимодействии плазменное облако, состоящее из ионов частицы и мишени, вытягивается ускоряющим потенциалом, под которым находится мишень, в сторону рефлектрона и затем регистрируется детектором на основе микроканаль-

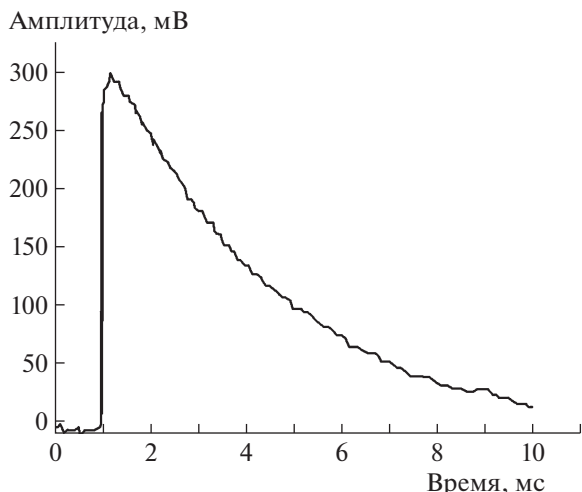


Рис. 3. Пример сигнала, снимаемого с мишени лабораторного прототипа прибора при моделировании высокоскоростного удара пылевой частицы в лабораторных условиях.

ных пластин (м.к.п.). На основании получаемых времяпролетных спектров ионов делается заключение об элементном составе материала пылевой частицы.

Моделирование времяпролетной части электронно-оптической схемы прибора проводилось по программе SIMION 8.0. Пример траекторий движения заряженных частиц во времяпролетной схеме показан на рис. 1. Оценка массового разрешения компьютерной модели показала возможность достижения $M/\Delta M \geq 30$.

На основании проведенного моделирования был разработан и изготовлен лабораторный прототип прибора, проведены работы по его сборке, настройке и проверке массового разрешения. Фотография изготовленного прототипа прибора приведена на рис. 4.

Изготовленный лабораторный прототип прибора соответствует штатному образцу в части геометрии электронно-оптической схемы, однако отличается по применяемым материалам. В лабораторном прототипе корпус прибора изготовлен из сплава АМгб, мишень-ионизатор — из стали с цинковым покрытием. Данные материалы были выбраны из соображений снижения стоимости производства. Кроме того, использование стали в материале мишени обусловлено желанием иметь большее разнообразие содержания химических элементов в массовом спектре прототипа в качестве маркеров на времяпролетных спектрах. В летном образце для изготовления корпуса прибора планируется использовать магниевый сплав, мишень планируется изготавливать из титана с покрытием активной поверхности золотом.



Рис. 4. Лабораторный прототип прибора ПИПЛС-А.

С изготовленным образцом были проведены работы по определению параметров времяпролетной электронно-оптической схемы прибора. В условиях моделирования высокоскоростного удара пылевой частицы путем ионизации материала мишени лазерным импульсом были получены времяпролетные спектры материала мишени, проведена оценка массового разрешения. Пример времяпролетного спектра, полученного в процессе настройки электронно-оптической схемы, приведен на рис. 5.

На основании полученных данных была проведена оценка массового разрешения изготовленного образца. Получено соотношение $M/\Delta M = 50$ для массового пика, соответствующего цинку (64 а.е.м.) по полной ширине на полувысоте. Согласно техническим требованиям, массовое раз-

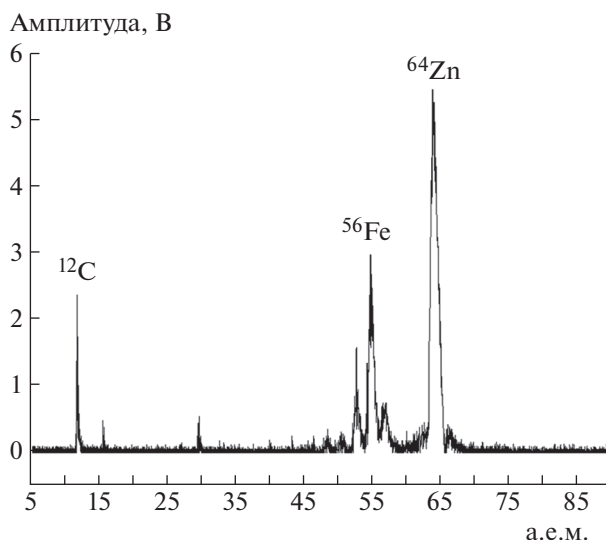


Рис. 5. Времяпролетный спектр при ионизации материала мишени лазерным воздействием.

решение прибора должно составлять ≥ 30 . Проведенные работы показали достижимость заявленных параметров.

5. РАБОЧЕЕ МЕСТО ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ПИПЛС-А

Для настройки и проведения испытаний образцов прибора ПИПЛС-А создано рабочее место, состоящее из вакуумной камеры, оснащенной безмасляной системой откачки, датчиками контроля уровня вакуума, оптическим окном, имеющим просветление на длину волны лазерного излучателя, и электрическими вводами. Для моделирования высокоскоростного удара использовался твердотельный ультрафиолетовый лазер с возможностью изменения энергии и длительности импульса. Варьирование данных параметров позволяло моделировать воздействие на мишень-ионизатор пылевых частиц с различными массами и скоростями. Рабочее место также оснащено лабораторными высоковольтными и низковольтными источниками питания и осциллографом. Во время проведения предварительных испытаний и настроек образцов прибора использовались внешние высоковольтные источники питания, что позволяло испытывать образцы времяпролетных модулей без применения штатных модулей электроники прибора.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемый в ИКИ РАН прибор ПИПЛС-А представляет собой относительно компактный и легкий пылеударный масс-спектрометр, позволяющий решать широкий спектр задач, связанных с изучением пылевых частиц, регистрируя их массу, составляющую вектора скорости, поток, элементный состав. Научная ценность получаемой информации может быть повышена либо за счет модернизации детектора

пролета частиц, что позволит определять полный вектор скорости движения частицы, либо путем размещения прибора на поворотной платформе. Проведенные испытания созданного лабораторного прототипа прибора указывают на достижимость поставленных научных задач. Разрабатываемый прибор может быть использован не только в рамках проекта “Интергелиозонд”, но в других космических миссиях, требующих мониторинга пылевой активности.

Авторы благодарны М. Маркичеву, К. Ануфрейчику, А. Коновалову, Р. Журавлеву, Д. Тимонину, С. Гусеву, А. Буторкину, К. Титову и Т. Шахвердян за участие в создании лабораторного прототипа прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuznetsov V.D., Zelenyi L.M., Zimovets I.V., Anufreychik K., Bezrukikh V., Chulkov I.V., Kononov A.A., Kotova G.A., Kovrazhkin R.A., Moiseenko D., Petrukovich A.A., Remizov A., Shestakov A., Skalsky A., Vaisberg O. L. et al. // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56. № 7. P. 781. <https://doi.org/10.1134/S0016793216070124>*
2. *Шахвердян Т.А., Вайсберг О.Л., Срама Р.* Проект “Интергелиозонд”. Труды рабочего совещания. (Таруса, 11–13 мая 2011) М.: ИЗМИРАН, 2012.
3. *Grün E., Srama R., Altobelli N., Altwegg K., Carpenter J., Colangeli L., Glassmeier K.-H., Helfert S., Henkel H., Horanyi M., Jäckel A., Kempf S., Landgraf M., McBride N., Moragas-Klostermeyer G. et al. // Exp. Astron. 2009. V. 23. Issue 3. P. 981. <https://doi.org/10.1007/s10686-008-9099-4>*
4. *Srama R., Altobelli N., de Kam J., Kempf S., Krüger H., Lera S., Moragas-Klostermeyer G., Rachev M., Srowig A., Landgraf M., Vod Q., Grün E. // Adv. Space Res. 2006. V. 38. № 9. P. 2093. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.09.009>*
5. *Willis M.J., Burchell M.J., Cole M.J., McDonnell J.A.M. // Planetary and Space Science. 2004. V. 52. № 8. P. 711. ISSN 0032-0633. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.01.001>*