_____ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, ____ МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.644.07

ПРОТОТИП МИНИАТЮРНОГО АНАЛИЗАТОРА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2019 г. А. Ю. Шестаков^{*a*,*}, Д. А. Моисеенко^{*a*}, С. Д. Шувалов^{*a*}, О. Л. Вайсберг^{*a*}, Р. Н. Журавлев^{*a*}

^а Институт космических исследований РАН Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32 *e-mail: sartiom 1@yandex.ru Поступила в редакцию 18.03.2019 г.

После доработки 23.04.2019 г. Принята к публикации 15.05.2019 г.

Работа посвящена решению задачи миниатюризации плазменных приборов, в частности проработке миниатюрного ионного анализатора для малых космических аппаратов. Описываемый прибор может быть использован как часть прогностического и диагностического комплекса, предназначенного для мониторинга состояния солнечного ветра и обнаружения критических событий. Целевые параметры прибора включают в себя возможность разделения протонов и α -частиц в диапазоне энергий 500–10000 эВ с разрешением по энергии $\Delta E/E$ не хуже 10%. Создаваемый прототип в летном исполнении должен соответствовать форм-фактору 1U стандарта CubeSat.

DOI: 10.1134/S0032816219060144

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача достоверного прогнозирования явлений космической погоды все еще далека от решения как из-за научной сложности, так и из-за недостаточного количество наблюдательных данных, доступных исследователям. Дальнейшему развитию методов прогнозирования космической погоды может способствовать создание системы одновременных измерений солнечного ветра и энергичных частиц в различных точках гелиосферы.

Такие измерения могут проводиться с помощью комплексов научных и контрольно-измерительных приборов, установленных на космических аппаратах на разных расстояниях от Земли. Если эти комплексы миниатюризированы, их можно разместить в качестве дополнительной полезной нагрузки на широком спектре космических аппаратов на разных орбитах, создавая широкую сеть измерительных станций и зондов космической погоды.

Очевидно, что в случае корональных выбросов масс, скорость которых может превышать скорость медленного солнечного ветра в 5–6 раз (и даже больше, в случае экстремального события), время предупреждения уменьшается до десятков минут (или меньше), что находится на грани практического использования предупреждения. В связи с этим станции мониторинга должны размещаться на больших расстояниях от Земли [1]. Глобальный мониторинг солнечного ветра и околоземного космического пространства требует локального размещения космических зондовых лабораторий одновременно в нескольких точках околоземного пространства [2, 3].

В минимальный состав мониторингового комплекса должны входить: анализаторы электронов и ионов плазмы солнечного ветра, детектор энергичных частиц [4, 5] и магнитометр.

Для измерения характеристик ионов солнечного ветра наиболее перспективными являются устройства с широким полем зрения и способные быстро измерять характеристики заряженных частиц в широком диапазоне энергий от десятков электронвольт до ~15 кэВ. Для решения этих задач используются различные конфигурации электронно-оптических систем, обеспечивающих анализ заряженных частиц по отношению энергии к заряду (E/O); для определения массового состава ионов такие системы могут быть дополнены времяпролетными схемами. Примерами таких приборов могут служить плазменные эксперименты FPI и HPCA проекта MMS, анализатор SWEA (анализатор электронов солнечного ветра) и SWIA (анализатор ионов солнечного ветра) в проекте MAVEN, SWEPAM и EPAM на борту космического аппарата АСЕ, расположенного в точке L1. В настоящее время это основные космические аппараты для научных исследований в области космической погоды [6].



Рис. 1. Трехмерная модель, содержащая фильтр скоростей (экранированный тонким проводящим слоем) и цилиндрический электростатический анализатор с углом поворота 127°.

Перечисленные приборы являются крайне сложными и дорогостоящими устройствами. Массогабаритные параметры этих приборов наряду с техническими и экономическими ресурсами требуют установки на относительно больших космических аппаратах и не могут использоваться на микроспутниках. Для развертывания крупномасштабной распределенной сети и мониторинга перспективно использование миниатюрных приборов.

2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Характерный энергетический диапазон частиц солнечного ветра, энергий ионов от 500 до 10000 эВ может быть покрыт комбинацией двух простых известных методов: выбора скорости посредством фильтра Вина и анализа по соотношению энергии к заряду (E/q) с помощью цилиндрического анализатора Юза–Рожанского (рис. 1).

Для моделирования блока электронной оптики прибора было использовано программное обеспечение Simion 8. В качестве ориентира для построения модели были выбраны существующие технологии производства постоянных магнитов NdFeB, которые позволяют достичь значений индукции около 5 кГс (0.5 Тл).

Для минимизации потенциалов на электродах оптической схемы был выбран минимальный зазор между электродами. Одновременно с этим мы стремились выбрать наиболее простую форму магнитов, чтобы избежать необходимости обработки сплава NdFeB. Эти принципы привели к



Рис. 2. Трехмерный вид (слева) и поперечное сечение (справа) прототипа фильтра скоростей. Вертикальные Т-образные элементы являются электродами, элементы, имеющие форму параллелепипедов, – постоянными магнитами.

Т-образной форме электродов и прямоугольной геометрии магнитов (рис. 2).

Фильтр Вина длиной 25 мм имеет отверстия \emptyset 1 мм на входе и выходе. Для оценки разрешающей способности модели фильтра по скорости $\Delta v/v$ у входного окна устройства были сгенерированы частицы H⁺, равномерно распределенные по углу влета от -5° до $+5^{\circ}$ относительно оси фильтра и имеющие равномерное распределение по скорости в пределах диапазонов 250–350, 350–650, 650– 850, 700–1100, 900–1300, 1100–1700 км/с. Потенциалы на электродах были отрегулированы таким образом, чтобы фильтр имел максимум пропускания на скоростях 300, 500, 700, 900, 1100 и 1400 км/с соответственно для каждой из групп.

Область детектирования находилась за входной диафрагмой электростатического анализатора. Были вычислены разности между максимальными и минимальными отклонениями скоростей частиц, прошедших через фильтр, от среднего значения на входе и оценены отношения $\Delta v/v$ для каждой из групп. Результаты этих оценок представлены на рис. 3, где видно, что $\Delta v/v$ составляет порядка 10% в диапазоне скоростей от 700 до 1400 км/с, но достигает 15% при скоростях ~500 км/с.

Вторым блоком оптики прибора, выполняющим анализ частиц, является цилиндрический анализатор Юза—Рожанского. Угол поворота частиц в анализаторе составляет 127°, что обеспечивает фокусировку частиц на выходе из устройства. Радиус центральной траектории равен 23.5 мм, зазор между электродами составляет 3 мм. На входе и выходе из анализатора расположены диафрагмы с квадратными отверстиями, стороны которых имеют размер 1 мм. Назначение диафрагм состоит в увеличении разрешения по энергии и уменьшении влияния рассеянного ультрафиолетового излучения. Для оценки разрешения $\Delta E/E$ анализатора по данным модели из выходной диафрагмы фильтра Вина была генерирована группа из 5000 протонов со скоростями, направленными к входной диафрагме электростатического анализатора. Ионы имели равномерное распределение по углу влета от -5° до $+5^{\circ}$ относительно оси фильтра и были равномерно распределены по энергии в диапазоне 700– 1300 эВ. Потенциалы на электродах анализатора были выбраны такими, чтобы анализатор имел максимум пропускания на энергии 1000 эВ. Анализ результатов симуляции показал, что расчетное разрешение $\Delta E/E$ устройства составило 4%.

Разрешение по энергии всего прибора было оценено по результатам серии симуляций с использованием 20000 тестовых частиц H⁺ со средними значениями энергий 500, 1000, 2000, ..., 10000 эВ, сгенерированных перед фильтром скоростей и детектированных у выходной диафрагмы электростатического анализатора. Каждая группа частиц имела равномерное распределение по углу влета от -5° до $+5^{\circ}$ относительно оси фильтра и была равномерно распределена по энергии в диапазоне $\pm 10\%$ от среднего значения. Был проведен подсчет частиц, проходящих через фильтр Вина и анализатор, и зарегистрированы их энергии (рис. 4).

Расчетное разрешение прибора по энергии составляет ~5%, что проиллюстрировано на рис. 5.

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Для проверки работоспособности выбранной схемы было решено собрать аналогичную схему из имеющихся элементов.

Мы использовали фильтр скоростей с большими размерами и меньшей напряженностью магнитного поля и электростатический анализатор со свойствами, близкими к тем, которые мы использовали в нашей основной модели, но с большими радиусами электродных пластин и большим зазором между ними (4 мм вместо 3 мм в основной модели). Конструкция прототипа показана на рис. ба. Индукция магнитного поля в зазоре фильтра скоростей *1* составила примерно 2.5 кГс. Диаметр входной диафрагмы – 1 мм, угол поворота частиц внутри электростатического анализатора $2 - 127^{\circ}$. Отношение $\Delta E/E$ было измерено с отсоединенным фильтром скоростей и составило ~5%.

Регистрация частиц проводилась при помощи вторично-электронного умножителя 3. Оценка разрешения $\Delta E/E$ электростатического анализатора была проведена при постоянных потенциалах на электродах, соответствующих максимуму пропускания устройства на энергии 1 кэВ; при этом энергия частиц, выпускаемых из источника ионов, изменялась в диапазоне от 950 до 1050 эВ с шагом 10 эВ.



Рис. 3. Разрешение $\Delta v/v$ фильтра Вина для различных скоростей He⁺, измеренное по компьютерной модели.



Рис. 4. Энергетические спектры частиц, зарегистрированных на выходе из модели.



Рис. 5. Зависимость энергетического разрешения $\Delta E/E$ от энергии частиц, рассчитанная для модели, включающей в себя фильтр скоростей и электростатический анализатор.

Прототип прибора был испытан на ионах различных масс, имеющих постоянную энергию 1 кэВ. В ходе испытаний использовались остаточный газ, гелий, азот, окись углерода и аргон. Напряжение на электродах электростатического анализатора выбиралось для эффективной регистрации однократно ионизованных частиц с энергией 1 кэВ. По-



Число частиц



Рис. 6. а — Внешний вид прототипа модели: $1 - \phi$ ильтр скоростей, 2 - электростатический анализатор, <math>3 - вторично-электронный умножитель;**б**- комбинированные массовые спектры заряженных частиц различных типов (остаточного газа, гелия, оксида углерода и ионов аргона) с энергиями 1 кэВ.

тенциал на фильтре скоростей варьировался в широких пределах, что позволило определить элементный состав регистрируемых заряженных частиц. Результаты сравнивались с составом, измеренным с помощью квадрупольного анализатора остаточных газов Extorr XT100. Результаты ионных измерений прототипом приведены на рис. 6б. Графики иллюстрируют массовые спектры ионов каждого типа газа. Нам удалось различить популяции Ar⁺, CO⁺/N₂⁺, H₂O⁺, OH⁺, N⁺ и He⁺.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Современное состояние прогнозирования космической погоды приводит к необходимости многоточечных измерений параметров магнитосферной и межпланетной плазмы. Создание сети прогнозирования космической погоды может оказаться слишком дорогостоящим, если не использовать дешевые, простые и малогабаритные приборы.

Представленная модель может стать еще одним шагом к миниатюризации простых приборов для анализа космической плазмы. Она не требует высокой точности изготовления и сборки и основана на использовании простых производящихся детекторах, требующих минимальной электроники и простых узлов электронной оптики. Данный прибор может быть установлен на различных миссиях по мониторингу космической погоды, межпланетных станциях, входить в состав комплекса приборов для анализа солнечного ветра.

По результатам испытаний модели достигнуты следующие характеристики прототипа: разрешение $dE/E \sim 5\%$; ориентировочный размер (Ш × B × Г) – $10 \times 8 \times 8$ см; ориентировочная масса – 400 г (лабораторная конфигурация) и 600 г (летная конфигурация).

Размеры модели дают возможность использования прибора в составе CubeSat и, вероятно, могут быть еще уменьшены при дальнейшей разработке. Лабораторная конфигурация прототипа является полностью функциональной, но не включает в себя высоковольтные преобразователи постоянного тока и интерфейсную электронику.

Хотя массовый диапазон, измеренный в лаборатории, не совпадает с массовым диапазоном частиц при измерении солнечного ветра, его можно легко отрегулировать, изменяя напряженность магнитного поля и напряжения на электродах фильтра скоростей.

Необходимым шагом для перехода к летной конфигурации прибора является оснащение прототипа угловым сканером, который обеспечит регистрацию частиц в большем телесном угле и даст возможность измерения функции распределения солнечного ветра.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 17-72-20134.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Кузнецов В.Д.* // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 16. С. 39.
- Amaya J., Musset S., Andersson V., Diercke A., Holler C., Iliev S., Juhasz L., Kiefer R., Lasagni R., Lejosne S., Madi M., Rummelhagen M., Scheucher M., Sorba A., Thonhofer S. // J. Space Weather and Space Climate. 2015. V. 5. Id. A5. https://doi.org/10.1051/swsc/2015005
- 3. Lavraud B., Zhang Y.C., Vernisse Y., Gershman D.J., Dorelli J., Cassak P.A., Dargent J., Pollock C., Giles B., Aunai N., Argall M., Avanov L., Barrie A., Burch J., Chandler M. et al. // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43.

P. 3042.

https://doi.org/10.1002/2016GL068359

- 4. Baker D., Balstad R., Bodeau M., Cameron E., Fenell J., Fisher G., Forbes K., Kintner P., Leffler L., Lewis W., Reagan J., Small A., Stansell T., Strachan L. National Research Council. 2008. Severe Space Weather Events: Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report. Washington, DC: The National Academies Press, 2008. https://doi.org/10.17226/12507
- Schrijver C., Kauristie K., Aylward A., Denardini C., Gibson S., Glover A., Gopalswamy N., Grande M., Hapgood M., Heynderickx D., Jakowski N., Kalegaev V., Lapenta G., Linker J., Liu S. et al. // Advances in Space Research. 2015. V. 55. Issue 12. P. 2745. https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023
- Stone E., Frandsen A., Mewaldt R., Christian E., Margolies D., Ormes J., Snow F. // Space Science Reviews. 1998. V. 86. Issue 1–4. P. 1 https://doi.org/10.1023/A:1005082526237