

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.644.07

МАСС-АНАЛИЗАТОР ИОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПИПЛС-Б  
ДЛЯ ПРОЕКТА “ИНТЕРГЕЛИОЗОНД”

© 2019 г. Д. А. Моисеенко<sup>а,\*</sup>, О. Л. Вайсберг<sup>а</sup>,  
М. В. Митюрин<sup>б</sup>, П. П. Моисеев<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт космических исследований РАН  
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

<sup>б</sup> ООО “НПП Астрон-Электроника”, Россия, Орел

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

Поступила в редакцию 03.04.2019 г.

После доработки 03.04.2019 г.

Принята к публикации 10.04.2019 г.

Описан энергомасс-анализатор ионов ПИПЛС-Б, предназначенный для измерений и исследования ионного и зарядового состава солнечного ветра и его источников в солнечной короне в рамках проекта “Интергелиозонд”. Основными преимуществами прибора являются: одномоментная регистрация массового состава ионов выбранной энергии, высокое энергетическое разрешение  $\Delta E/E = 5\%$  и массовое разрешение  $M/\Delta M = 60$ , широкий энергетический диапазон от 1 до 20 кэВ, относительно небольшие размеры и вес. Проведено компьютерное моделирование электронно-оптической схемы прибора, изготовлен и испытан оригинальный детекторный узел прибора.

DOI: 10.1134/S0032816219050227

## ВВЕДЕНИЕ

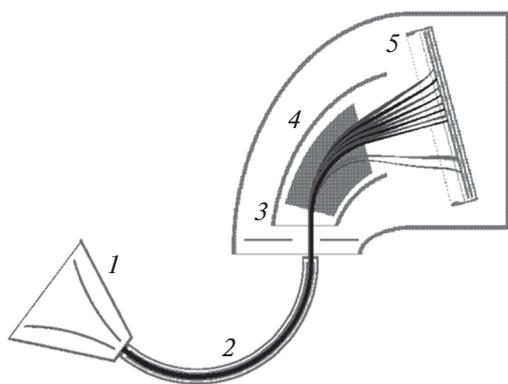
Одними из основных научных целей проекта “Интергелиозонд” являются исследования характеристик солнечного ветра на различных гелиоцентрических широтах и различных расстояниях от Солнца, механизмов нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра [1–7]. В настоящее время разработаны и используются анализаторы, в которых состав солнечного ветра измеряется с помощью комбинированного анализа ионов в электрическом поле, времяпролетном анализаторе и измерением полной энергии с помощью полупроводникового детектора. Из них можно выделить такие инструменты как SWICS [8], PLASTIC [9] и STICS [10]. Эти приборы сложны и дороги, и их отработка до современного уровня заняла более 25 лет.

Учитывая, что ионы в потоке солнечного ветра имеют близкие скорости, было решено разработать энергомасс-спектрометр, позволяющий проводить анализ частиц по отношениям энергии к заряду ( $E/Q$ ) и массы к заряду ( $M/Q$ ) и обладающий достаточно высоким энергетическим и массовым разрешением при сравнительно малом весе и простой конструкции.

Основной задачей прибора ПИПЛС-Б является измерение характеристик солнечного ветра: ионного и зарядового состава, скорости, темпера-

туры, концентрации и функции распределения по скоростям. Подобные измерения позволяют получать данные, необходимые для изучения источников солнечного ветра, механизмов нагрева ионных компонентов солнечного ветра, измерений электронной температуры короны, дадут возможность связать наблюдаемые потоки солнечного ветра с его источниками при помощи оптических изображений Солнца и короны и моделей ускорения и распространения солнечного ветра [2].

Разрабатываемый прибор обеспечивает одномоментную регистрацию массового спектра частиц с выбранной энергией, позволяя одновременно детектировать легкие и тяжелые ионы. Измерения относительного содержания и ионизационного состояния малых составляющих солнечного ветра, таких как O, Si и Fe, являются важным наблюдательным материалом для решения задач локализации областей в солнечной короне, являющихся источниками наблюдаемых потоков солнечного ветра. Состав тяжелых ионов и параметры потока солнечного ветра определяются источниками в солнечной короне. Эти данные, а также измерения функций распределения ионов по скоростям, позволяют исследовать механизмы ускорения солнечного ветра [3].



**Рис. 1.** Компьютерная модель анализатора прибора ПИПЛС-Б. 1 – сканирующее устройство; 2 – электростатический анализатор; 3 – дрейфовая трубка; 4 – магнитная система; 5 – координатно-чувствительный м.к.п.-детектор.

### ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРИБОРА И ПРИНЦИП ЕГО РАБОТЫ

Для определения необходимых характеристик ионов солнечного ветра в приборе используется комбинация двух типов разделения частиц: в электрических и магнитных полях. Первый позволяет выбрать ионы с определенной величиной энергии на единицу заряда  $E/Q$  [4], второй – разделить ионы с выбранной энергией по отношению массы к заряду  $M/Q$  [5]. Впервые прибор с подобным типом селекции частиц был использован в 1970-х годах: энергомасс-анализатор РИП-803, работавший на спутнике “Прогноз-2” в начале 1970-х годов [6], последовательно измерял энергетические спектры протонов,  $\alpha$ -частиц и однократно ионизованного гелия. Прибор успешно проработал в составе космического аппарата, зарегистрировав спектры протонного и  $\alpha$ -компонентов солнечного ветра [7].

Разрабатываемый прибор представляет собой моноблок, состоящий из двух основных модулей: модуля электронной оптики и модуля электроники. Модуль электронной оптики состоит из пяти анализаторов, отличающихся друг от друга направлением визирования по азимутальному углу. Структура электронно-оптической схемы одного анализатора представлена на рис. 1.

Для анализа частиц по соотношению энергии к заряду в приборе используются электростатические анализаторы (э.с.а.) с углом раствора  $127^\circ$  (2), которые позволяют регистрировать ионы с энергиями до 20 кэВ на единичный заряд с разрешением  $\Delta E/E \sim 5\%$ .

Разделение ионов по параметру  $M/Q$  осуществляется системой из постоянных магнитов 4. Магнитная система состоит из параллельных магнитных пластин, соединенных магнитопроводом. Магнитные пластины по форме представ-

ляют сектор круга с вырезанным центром. Угол между гранями сектора составляет  $60^\circ$ . Напряженность магнитного поля в зазоре между пластинами составляет 8.5 кЭ. В комбинации с э.с.а магнитный анализатор позволяет получить массовое разрешение  $M/\Delta M$  не менее 60.

Для ускорения ионов перед пролетом через магнитную систему в приборе применяется дрейфовая трубка 3, представляющая собой систему из трех электродов: корректирующего электрода на входе, ускоряющего электрода и экранирующей сетки перед модулем координатно-чувствительного детектора 5. Боковые и фронтальные стенки ускоряющего электрода соединены с ускоряющей сеткой для компенсации влияния рассеянных полей на траектории движения ионов. Корректирующий электрод представляет собой пластину с прямоугольной диафрагмой и предназначен для уменьшения влияния неоднородностей поля на пролет ионов. Боковые стенки ускоряющего электрода и боковые части экранирующей сетки перед детектором представляют собой одно целое, что компенсирует нежелательное влияние рассеянных полей на траектории движения ионов.

После прохождения через магнитную систему ионы регистрируются координатно-чувствительным детектором 5 на основе микроканальных пластин (м.к.п.). Информация о координатах прихода ионов позволяет сделать выводы о распределении потока ионов с заданным  $E/Q$  по параметру  $M/Q$ .

Для обеспечения необходимых полей зрения  $\sim 45^\circ$  по полярному углу в приборе используется сканирующее устройство 1, состоящее из двух симметричных электродов в экранирующей кожухе, расположенных на входе электростатических анализаторов. Управление направлением визирования осуществляется подачей различных уровней напряжений на электроды сканирующего устройства. Обеспечение поля зрения прибора по азимутальному углу достигается поворотом оси симметрии э.с.а. относительно оси прибора. Ось центрального э.с.а совпадает с вертикальной осью прибора, оси остальных – наклонены относительно вертикали на  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $-10^\circ$  и  $-20^\circ$  соответственно.

Моделирование работы прибора, выполненное с использованием программы SIMION 8.1 [11], и проработка его конструкторской модели позволили провести оценку аналитических характеристик разрабатываемого прибора.

**Характеристики прибора:** аналитические – диапазон энергий 1–20 кэВ, массовый диапазон ( $M/Q$ ) 2–9, массовое разрешение ( $M/\Delta M$ ) 60, энергетическое разрешение ( $\Delta E/E$ ) 5%, полный угол зрения до  $45^\circ \times 45^\circ$ , угловое разрешение  $\sim 2^\circ$ ; технические – масса  $\sim 3.5$  кг, габариты анализатора  $230 \times 170 \times 120$  мм, энергопотребление 5–10 Вт,

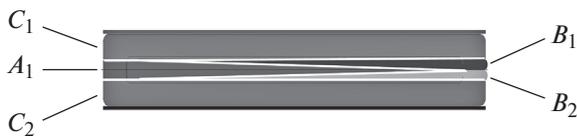


Рис. 2. Структура одной из пяти коллекторных групп анода детекторного узла прибора ПИПЛС-Б.

информативность 1–200 кбит/с (в зависимости от режима работы).

### КОНСТРУКЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ПРИБОРА ПИПЛС-Б

В процессе создания прибора были проведены испытания прототипа координатно-чувствительного детектора ПИПЛС-Б. Разработанный детектор был изготовлен на основе шевронной сборки из трех м.к.п. с размерами 70 × 90 мм.

Для определения координаты прихода частицы на детектор используется анод с пятью группами коллекторов. Коллекторы каждой группы отвечают за регистрацию координаты частицы, прошедшей по соответствующему анализатору. Структура одной группы коллекторов показана на рис. 2. Коллекторы  $A_1$  в виде клина и  $B_1$  и  $B_2$ , образующие форму ласточкиного хвоста, предназначены для определения координаты прихода частицы. Коллекторы  $C_1$  и  $C_2$  – полосы, служащие для регистрации полного заряда, попавшего на анод. Расчет координаты прихода частицы для каждого из каналов осуществляется по формуле  $X = A_1 / (A_1 + B_1 + B_2 + C_1 + C_2)$ . Общая длина одной группы коллекторов составляет 90 мм, ширина 12 мм. Ширина основания клина 2,8 мм. Расстояние от анода до м.к.п. составляет 12,7 мм.

Для изготовленного прототипа детекторного узла была проведена проверка функционирования под потоком частиц из ионного источника при установленной над входным окном детектора диафрагмой. Диафрагма представляла собой металлическую пластину с просверленными в ней отверстиями  $\varnothing 1$  мм. Пример получаемых изображений с каналов детектора приведен на рис. 3. Испытания показали, что детектор предложенной конструкции позволит обеспечить требуемое разрешение прибора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемый прибор предназначен для изучения характеристик солнечного ветра: ионного и зарядового состава, скорости, температуры и концентрации. Проведение подобных исследований позволит получить новые научные данные об источниках солнечного ветра, сделать

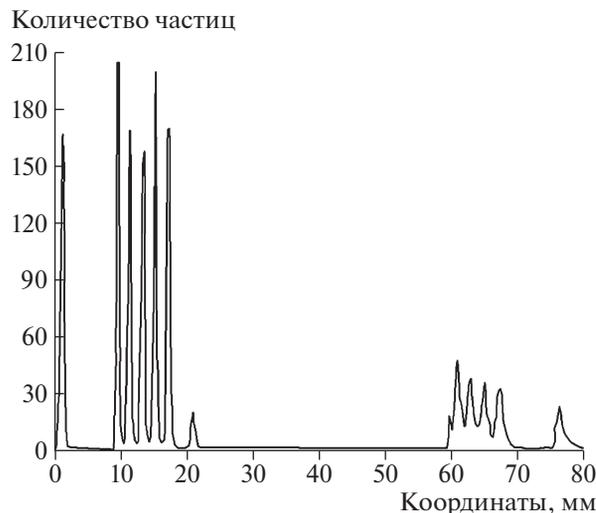


Рис. 3. Регистрация распределения частиц от источника ионов на одном из каналов детектора при работе с установленной перед детектором диафрагмой.

выводы о механизмах нагрева ионных компонентов солнечного ветра, провести измерения электронной температуры короны.

Сравнение аналитических характеристик разрабатываемого прибора с существующими аналогами позволяет выделить его основные преимущества: относительно небольшие размеры и вес, высокое энергетическое и массовое разрешение, широкий энергетический диапазон, широкое поле зрения.

Разработана математическая модель работы прибора, проведено моделирование работы прибора, подтверждающее достижимость желаемых аналитических характеристик, разработана конструкторская модель прибора, собран и испытан детекторный узел. Выполненные работы позволяют сделать вывод, что прибор обладает характеристиками, позволяющими решать поставленные экспериментальные задачи и способен составить конкуренцию аналогичным энерго-масс-спектрометрам.

### 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. *Вайсберг О.Л., Койнаш Г.В., Моисеев П.П., Летуновский В.В., Тоньшев А.К., Подколзин С.Н., Шестakov А.Ю., Журавлев Р.Н., Шахвердян Т.А. Проект “Интергелиозонд”. Труды рабочего совещания (Таруса, 11–13 мая 2011). М.: ИЗМИРАН, 2012. С. 151.*

3. *Geis, J., Gloeckler G., Von Steiger R.* // Space Science Rev. 1995. V. 72(1–2). P. 49.  
<https://doi.org/10.1007/bf00768753>
4. *Hughes A.L., Rojansky V.* // Phys. Rev. 1929. V. 34(2). P. 284.  
<https://doi.org/10.1103/physrev.34.284>
5. *Готт Ю.В., Курнаев В.А., Вайсберг О.Л.* Корпускулярная диагностика лабораторной и космической плазмы. М.:МИФИ, 2008
6. *Зерцалов А.А., Вайсберг О.Л., Темный В.В.* // Космические исследования. 1976. Вып. 2. С. 257.
7. *Вайсберг О.Л., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Омельченко А.Н.* // Космические исследования. 1980. Вып. 18. С. 761.
8. *Gloeckler G., Ipavich J., Tums F., Bedini E., Fisk P., Zurbuchen L., Bochsler T., Fischer P., Wimmer-Schweingrubner J., Geiss R., Kallenbach R.* // Space Science Rev. 1998. V. 86. P. 497.  
<https://doi.org/10.1023/A:1005036131689>
9. *Galvin A.B., Kistler L.M., Popecki M.A., Farrugia C.J., Simunac K.D.C., Ellis L., Möbius E., Lee M.A., Boehm M., Carroll J., Crawshaw A., Conti M., Demaine P., Ellis S., Gaidos J.A. et al.* // Space Science Rev. 2008. V. 136(1–4). P. 437.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-007-9296-x>
10. *Gloeckler G., Balsiger H., Buergi A., Bochsler P., Fisk L.A., Galvin, A.B., Geiss J., Gliem F., Hamilton D.C., Holzer T.E., Hovestadt D., Ipavich F.M., Kirsch E., Lundgren R., Ogilvie K.W. et al.* // Space Science Rev. 1995. V. 71(1–4). P. 79.  
<https://doi.org/10.1007/bf00751327>
11. <https://simion.com>