

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.646

ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПАКТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ЭКОС ДЛЯ СПУТНИКОВ CUBESAT

© 2020 г. С. Д. Шувалов^{а,*}, А. Ю. Шестаков^а, А. В. Носов^а, М. В. Митюрин^б,
Д. А. Моисеенко^а, Р. Н. Журавлев^а

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

^б НПП «АСТРОН-ЭЛЕКТРОНИКА»
Россия, 302019, Орёл, ул. Веселая, 2

*e-mail: shuvalovsergei@gmail.com

Поступила в редакцию 06.11.2019 г.

После доработки 27.11.2019 г.

Принята к публикации 30.11.2019 г.

Описан электронный компактный спектрометр ЭКОС, предназначенный для одномоментной (здесь и далее означает одновременное накопление счета электронов с различными параметрами) регистрации электронов солнечного ветра в относительно широком диапазоне энергий. Компьютерное моделирование схемы электронной оптики прибора позволило получить следующие аналитические характеристики: диапазон одномоментно регистрируемых энергий от E_0 до $4.7E_0$ с разрешением $\sim 25\%$, одномоментное поле зрения по азимутальному углу $\sim 50^\circ$, поле зрения по полярному углу $\sim 15^\circ$ (разрешение по данному направлению отсутствует). К настоящему моменту изготовлен макет блока электронной оптики, габариты которого вместе с платой электроники и детекторным узлом составляют $72 \times 95 \times 57$ мм, что обеспечивает возможность установки прибора на спутники формата CubeSat. Проведены лабораторные испытания координатно-чувствительного детектора устройства, демонстрирующие возможность разрешения ~ 10 -ти полос в каждом из двух измерений, что достаточно для обеспечения функционирования данной оптики.

DOI: 10.31857/S0032816220030040

1. ВВЕДЕНИЕ

Для анализа параметров электронов солнечного ветра разработана конструкция электронного компактного спектрометра ЭКОС, электронно-оптическая схема которого основана на электростатическом анализе заряженных частиц. Ключевой особенностью разрабатываемого прибора являются его малые габариты, что отличает его от анализаторов типа top-hat, используемых в настоящее время для решения аналогичных задач [1, 2]. Существующие в настоящее время приборы, в которых одномоментная регистрация широкого спектра электронов по энергии достигается путем разделения частиц в неоднородном магнитном поле [3], имеют, как правило, большие размеры магнитной системы, что делает данный тип устройств неприменимым на космических аппаратах формата CubeSat (малые космические аппараты, построенные из блоков размером $100 \times 100 \times 100$ мм и массой не более 1.33 кг; каждый такой блок называется Unit (U)) [4].

На рис. 1 представлена фотография разрабатываемого макета прибора ЭКОС с используемой

при измерениях системой координат, где φ — азимутальный угол, а θ — полярный. Создаваемый спектрометр электронов способен детектировать частицы в диапазоне энергий от 30 эВ до 10 кэВ и позволит проводить быстрый анализ распределения по энергиям потока электронов за счет большой площади входного окна и возможности одномоментной регистрации широкого диапазона энергий (от E_0 до $4.7E_0$). (Под одномоментной регистрацией здесь и далее подразумевается одновременное накопление счета электронов с различными параметрами.) Частота записи кадров с информацией зависит от параметров используемой электроники, ожидается, что она составит ~ 5 Гц. Расчетное разрешение прибора $\Delta E/E$ составляет $\sim 25\%$ и зависит от энергии и угла прихода частицы.

Требования к энергетическому разрешению электронных спектрометров определяются их научными задачами. Так, например, спектрометр электронов солнечного ветра SWEA [2], установленный на спутнике Марса MAVEN, имеет разрешение 17%, что обусловлено требованием различать плазму солнечного ветра и электроны ионосферного

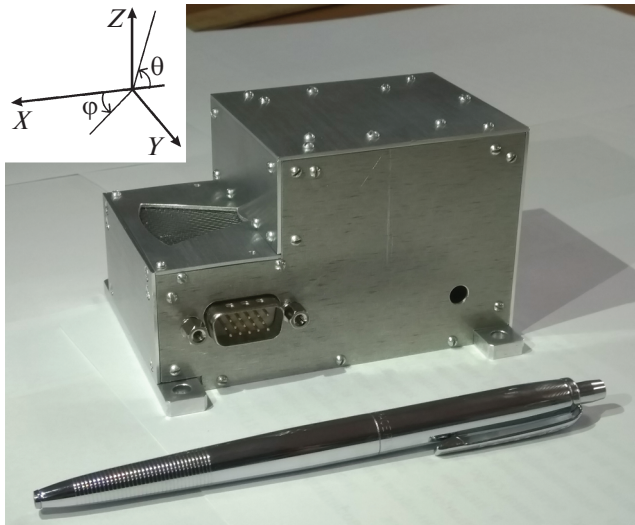


Рис. 1. Фотография макета прибора. В левом верхнем углу — используемая при измерениях система координат: φ — азимутальный угол, а θ — полярный.

происхождения. Прибор ЭКОС предназначен для проведения непрерывного мониторинга солнечного ветра на борту малого космического аппарата и измерения скорости и концентрации его электронов. Для решения данной задачи существенными параметрами являются поле зрения прибора и диапазон измеряемых энергий, энергетическое разрешение при этом не играет определяющей роли. Угловой размер пучка электронов солнечного ветра составляет менее 10° , однако малые космические аппараты, как правило, имеют ограниченную точность задания ориентации,

что диктует требование к более широкому полю зрения прибора. Энергии электронов в солнечном ветре лежат в диапазоне 30 эВ–10 кэВ.

2. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРИБОРА И ПРИНЦИП ЕГО РАБОТЫ

Метод, используемый в приборе ЭКОС для анализа распределения электронов по энергии и углу, основан на разделении заряженных частиц в электростатическом поле двух плоских зеркал, разделенных коллиматором (рис. 2). Конструктивно прибор состоит из дефлектора, в состав которого входят входное окно 1 и плоский электрод 2; коллиматора 3, представляющего собой комбинацию из двух диафрагм 3.1 и 3.2, заключенных в закрытый корпус; энергоанализатора, внутри которого размещен плоский электрод 4; и координатно-чувствительного детектора (к.ч.д.) на основе микроканальных пластин 5.

Дефлектор предназначен для увеличения числа переотражений, которые претерпевают кванты ультрафиолетового излучения Солнца на пути от входного окна прибора к детектору, что необходимо для уменьшения ложного счета частиц. Электроны внутри данного узла прибора разворачиваются от входного окна, на котором размещена проводящая сетка, по направлению к коллиматору под действием квазиоднородного электростатического поля, создаваемого электродом 2, на который подается отрицательный потенциал, и заземленным корпусом.

Коллиматор служит для отбора электронов, скорости которых направлены в определенном угловом диапазоне, составляющем $\sim 15^\circ$ по поляр-

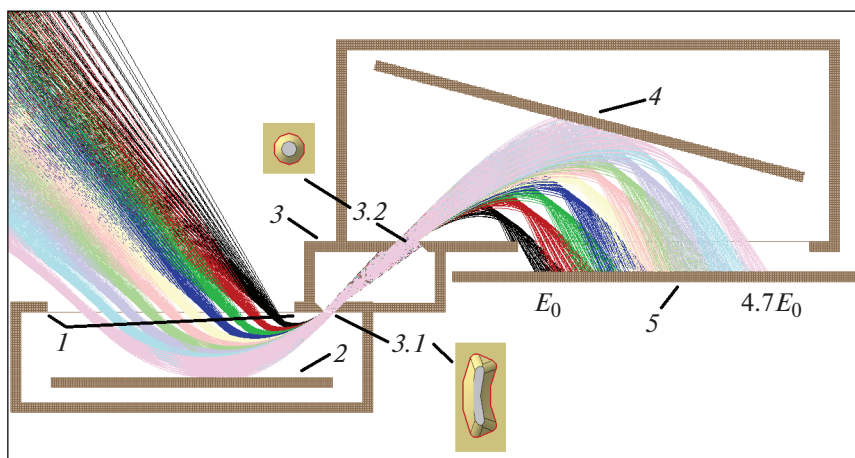


Рис. 2. Центральное сечение блока электронной оптики прибора вдоль плоскости XZ (см. рис. 1), выполненное в программе SIMION. 1 — входное окно, 2 — электрод дефлектора, 3 — коллиматор, 4 — электрод энергоанализатора, 5 — детектор. Сплошными линиями обозначены траектории движения электронов с десятью различными энергиями, значения которых равномерно распределены от E_0 до $4.7E_0$. Векторы начальных скоростей частиц имеют азимут 0° ; полярный угол распределен в диапазоне $-(36^\circ-46^\circ)$.

ному углу и $\sim 50^\circ$ по азимутальному. Это достигается путем использования двух диафрагм, одна из которых (3.1) имеет форму полумесяца, а другая (3.2) – круга (см. рис. 2).

В энергоанализаторе происходит разделение электронов, имеющих различные энергии, по координате в электростатическом поле плоского электрода, на который также подается отрицательный потенциал. Для обеспечения одномерной регистрации заряженных частиц с энергиями от 1 до 4.7 кэВ потенциал на электроде дефлектора должен быть равен -2.55 кВ, а на электроде энергоанализатора -3.1 кВ. Для изменения диапазона регистрируемых энергий требуется прямо пропорционально изменить потенциалы на обоих электродах.

Детектор на основе микроканальных пластин представляет собой серийное изделие ВЭУ-7М с коллектором, изготовленным по схеме “клинья-полосы” (wedge-and-strip) [5] и состоящим из трех анодов, сигналы с которых усиливаются зарядочувствительными усилителями (з.ч.у.). Соотношения амплитуд импульсов, зарегистрированных каждым з.ч.у., дают информацию о координатах прилета частицы на детектор и, соответственно, угле ее прилета и энергии. Более подробное описание работы детектора и результаты его лабораторных испытаний приведены ниже, в разд. 4.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИКИ ПРИБОРА МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Для определения регистрируемых диапазонов энергий, азимутальных и полярных углов влета электронов, а также разрешения прибора по энергии была построена модель электронной оптики в программе SIMION [6]. Так как оптика прибора симметрична относительно плоскости рис. 2, достаточно было провести моделирование для половины регистрируемых прибором азимутальных углов.

Начальные координаты частиц разыгрывались равномерно случайным образом на прямоугольнике, параллельном плоскости XY и ограниченном с одной стороны плоскостью, параллельной XZ и касающейся диафрагмы 3.2, а с другой – размерами входного окна. Полярные углы входивших до плоскости детектора, представлены на рис. 3. Согласно полученным распределениям, поле зрения прибора составляет $\sim 15^\circ$ по полярному углу и $\sim 25^\circ$ по азимутальному углу в каждом из двух направлений.

Моделирование проводилось 5 раз для следующих начальных энергий частиц: 1, 2, 3, 4, 4.7 кэВ. Распределения начальных полярных и азимутальных углов частиц всех энергий, долетевших до плоскости детектора, представлены на рис. 3. Согласно полученным распределениям, поле зрения прибора составляет $\sim 15^\circ$ по полярному углу и $\sim 25^\circ$ по азимутальному углу в каждом из двух направлений.

Энергетическое разрешение было измерено для трех азимутальных углов. Для этого для каж-

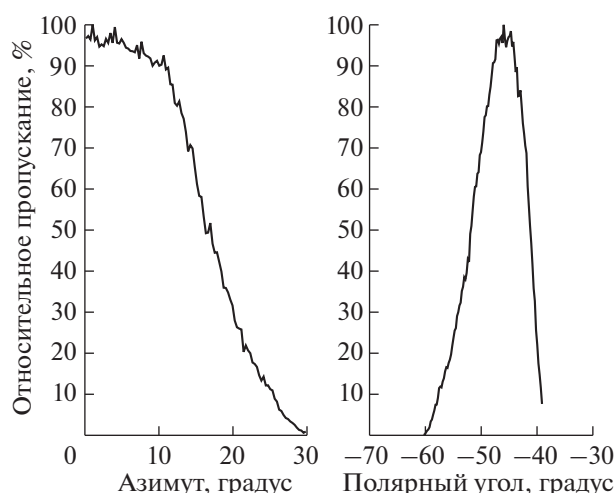


Рис. 3. Распределения начальных полярных (справа) и азимутальных (слева) углов скоростей электронов, достигших детектора. Начальные энергии частиц: 1, 2, 3, 4, 4.7 кэВ.

дой из пяти энергий были отобраны 3 группы частиц, векторы начальных скоростей которых имели азимутальные углы, находящиеся в диапазонах: $0^\circ-5^\circ$, $5^\circ-15^\circ$ и $15^\circ-25^\circ$. Затем координаты каждой группы частиц на детекторе были спроецированы на прямую, проходящую через проекцию круглой диафрагмы на плоскость детектора и составляющую с плоскостью XZ угол 0° , 10° и 20° в зависимости от исследуемого азимута. При помощи линейного преобразования (индивидуального для каждого азимута) координата каждой частицы на данной оси была переведена в энергию. Получившиеся распределения частиц приведены на рис. 4. Энергетическое разрешение прибора $\Delta E/E$ было оценено как отношение полной ширины каждого пика на полувысоте к средней энергии и приведено в табл. 1.

4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДЕТЕКТОРНОГО УЗЛА ПРИБОРА

Для проверки функционирования координатно-чувствительного детектора и определения его пространственного разрешения была изготовле-

Таблица 1. Энергетическое разрешение прибора для различных азимутальных углов и энергий

φ, градус	Энергетическое разрешение, %, для энергий, кэВ				
	1	2	3	4	4.7
0	38	35	26	20	6
10	40	38	29	20	7
20	35	38	25	17	7

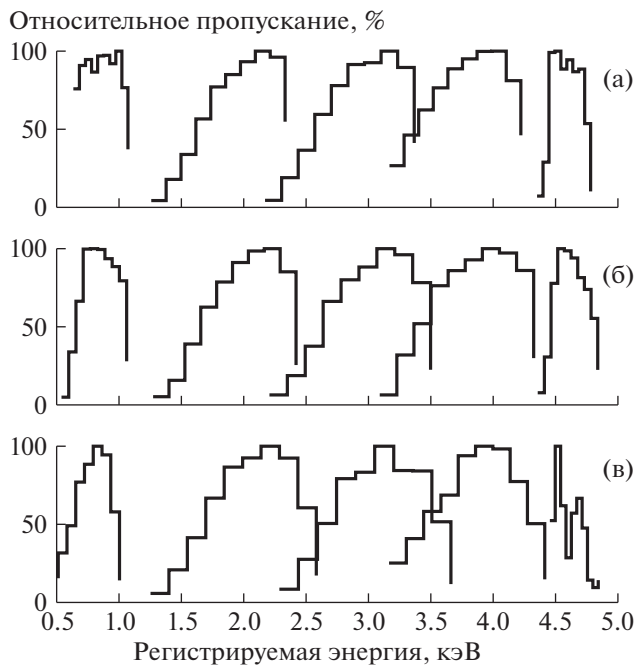


Рис. 4. Распределения координат частиц с энергиями 1, 2, 3, 4 и 4.7 кэВ на детекторе для азимутальных углов 0° (а), 10° (б) и 20° (в).

на мира из металлической пластины толщиной 0.5 мм с просверленными в ней отверстиями двух разных диаметров, расположенными в узлах квадратной сетки с шагом 5 мм. Диаметр крупных отверстий составил 1.0–1.2 мм, мелких – 0.5–0.7 мм. Данная мира была установлена над детектором прибора, и через нее проводилась непосредственная засветка детектора электронным пучком.

Измеренные при регистрации отдельной частицы амплитуды импульсов A , B , C каждым з.ч.у. могут быть переведены в координаты прилета этой частицы на детектор при помощи следующих формул:

$$X = \left(\frac{aA}{aA + bB + cC} + x_0 \right) x_s;$$

$$Y = \left(\frac{bB}{aA + bB + cC} + y_0 \right) y_s,$$

где коэффициенты a , b , c , x_0 , y_0 , x_s , y_s подбираются вручную и зависят от геометрии анодов и параметров используемой электроники.

Полученное в результате такой операции двумерное распределение частиц на детекторе представлено на рис. 5а.

Для оценки пространственного разрешения детектора было построено горизонтальное сечение распределения частиц на детекторе, прошедших через центральный ряд отверстий мира (рис. 5б). Так как пятно на детекторе является сверткой функции пропускания мира и передаточной функции

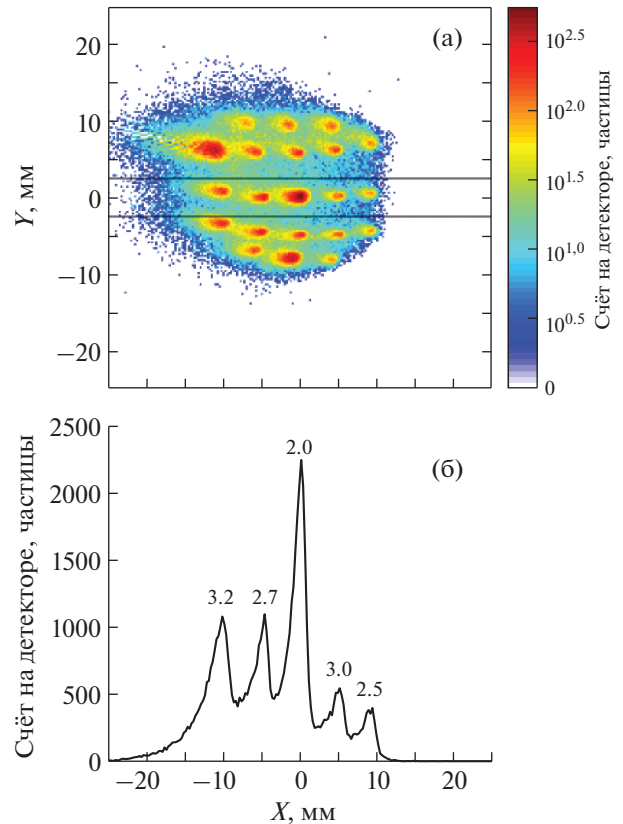


Рис. 5. а – изображение, полученное на детекторе при его освещении электронным пучком через миру, горизонтальные полосы обозначают пределы интегрирования приведенного снизу распределения; б – горизонтальный профиль распределения частиц на детекторе, над каждым пиком указана его полная ширина на полувысоте в миллиметрах.

детектора, то в приближении их функциями Гаусса можно записать:

$$s^2 = r^2 + d^2,$$

где s – зарегистрированная ширина пика; d – размер отверстия; r – пространственное разрешение детектора.

Таким образом, для представленных на рис. 5 пиков разрешение детектора варьируется от 1.7 до 3.1 мм, что позволяет различить ~10 полос в каждом из измерений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемый прибор ЭКОС предназначен для проведения мониторинга электронов солнечного ветра с высоким временным разрешением, что достигается благодаря одномоментной регистрации частиц относительно широкого диапазона энергий. Поле зрения прибора $15^\circ \times 50^\circ$ позволит постоянно удерживать в видимости пучок солнечного ветра размером $<10^\circ$ с учетом

ограниченных возможностей поддержания ориентации малых космических аппаратов. Расчетное энергетическое разрешение спектрометра ~25% обеспечивает решение задачи мониторинга солнечного ветра, а его малые габариты – возможность его размещения в 1U формата CubeSat. Заявленный диапазон измеряемых энергий 30 эВ–10 кэВ покрывается $n = \log_{4.7} \frac{10^4}{30} \approx 4$ последовательными переключениями потенциалов на блоке электронной оптики, что позволяет снимать полный спектр электронов с частотой ~1 Гц. Проведенные лабораторные испытания детектора продемонстрировали его достаточное пространственное разрешение для обеспечения потребностей блока электронной оптики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает благодарность О.Л. Вайсбергу за полезные рекомендации, высказанные в ходе разработки прибора.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burt J., Smith B.* // IEEE Aerospace Conference Proc. 2012.
<https://doi.org/10.1109/aero.2012.6187025>
2. *Mitchell D.L., Mazelle C., Sauvaud J.-A., Thocaven J.-J., Rouzaud J., Fedorov A., Rouger P., Toubanc D., Taylor E., Gordon D., Robinson M., Heavner S., Turin P., Diaz-Aguado M., Curtis D.W., Lin R.P., Jakosky B.M.* // Space Sci. Rev. 2016. V. 200. Issue 1–4. P. 495.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0232-1>
3. *Michell R.G., Samara M., Grubbs G., Ogasawara K., Miller G., Trevino J.A., Webster J., Stange J.* // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. V. 121. Issue 6. P. 5959.
<https://doi.org/10.1002/2016JA022637>
4. www.cubesat.org
5. *Martin C., Jelinsky P., Lampton M., Malina R.F.* // Rev. Sci. Instrum. 1981. V. 52(7). P. 1067.
<https://doi.org/10.1063/1.1136710>
6. www.simion.com