

УДК 539.1.074

Ю. В. МИНЕЕВ, Е. С. СПИРЬКОВА

## СПЕКТРОМЕТР ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ НА СПУТНИКАХ

Изучение потоков и спектров заряженных частиц в магнитосфере Земли на космических аппаратах требует создания все более совершенных спектрометров, специально приспособленных к магнитосферным физическим условиям. К настоящему времени относительно хорошо известны потоки электронов и протонов, существующие в магнитосфере. Они могут достигать для электронов с  $E_e \geq 0,2$  МэВ величин до  $10^7$  част./см<sup>2</sup>·с·ср в максимуме внешнего пояса и до  $10^4$  част./см<sup>2</sup>·с·ср в зоре [1, 2].

Потоки заряженных частиц, особенно в области малых и средних энергий, часто подвержены вариациям, которые максимальны во внешнем радиационном поясе. Все это требует достаточно длительных измерений потоков частиц в магнитосфере. В настоящее время таких измерений немного, что отчасти объясняется отсутствием достаточно эффективной методики регистрации электронов на фоне интенсивных потоков протонов.

Развитие техники изготовления полупроводников позволило создать эффективный спектрометр для регистрации электронов малых и средних энергий. Он представляет собой систему полупроводниковых детекторов, состоящую из тонкого  $\frac{dE}{dx}$ - и толстых  $E$ -детекторов, помещенных друг под другом. Одновременно такая система позволяет с эффективностью, близкой к 100%, регистрировать и протоны малых и средних энергий. Методика  $\frac{dE}{dx} - E^2$  позволяет эффективно отделять заряженные частицы по массе (протоны от электронов). Действительно, при надлежащем выборе толщины  $\frac{dE}{dx}$ - детектора электроны проходят сквозь него и регистрируются только  $E$ -детектором, а тяжелые частицы — протоны с энергией такой же, как и у электронов, останавливаются в  $\frac{dE}{dx}$ - детекторе. Вариант этой методики применительно к диапазону энергий электронов 0,2—3,0 МэВ осуществлен в рассматриваемом спектрометре. Один из видов спектрометра для межпланетного пространства, примененный на спутнике «Прогноз-4», приведен в работе [3].

Спектрометр для измерений в магнитосфере был сконструирован таким образом, чтобы можно было регистрировать потоки электронов до  $10^7$  част./см<sup>2</sup>·с·ср в присутствии фона протонов до  $5 \cdot 10^7$  част./см<sup>2</sup>·с·ср для полупроводниковых детекторов и до  $10^5$  част./см<sup>2</sup>·с·ср для газоразрядных. В состав спектрометра входят два блока. Блок А — блок датчиков, в нем находятся полупроводниковый спектрометр, составленный из «пролетных» кремниевых счетчиков, и система из двух газоразрядных микрогабаритных счетчиков мягкого  $\beta$ -излучения, а также устройства формирования импульсов.

Блок Б — блок электроники, в нем расположены устройства пересчета регистрируемых импульсов и вывода информации на телеметрию.

Спектрометр разработан на основе телескопа [1, 2], модифицированного в соответствии с поставленными задачами физического эксперимента в магнитосфере Земли. Телескоп состоит из трех полупроводниковых счетчиков, установленных в алюминиевом коллиматоре с углом раствора  $20^\circ$  (рис. 1). Первый, Дт 1, поверхностно-барьерный детектор  $\frac{dE}{dx}$ , имеет толщину  $\sim 50$  мкм, диаметр  $\sim 8$  мм; второй де-

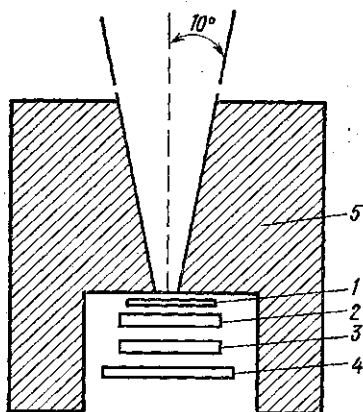


Рис. 1. Схема телескопа. 1 — пролетный поверхностно-барьерный детектор толщиной  $d = 50$  мкм, диаметром 8 мм; 2, 3 — проходные кремниевые литий-дрейфовые детекторы,  $d = 2$  мм,  $\varnothing = 12$  мм; 4 — антисовпадаемый детектор,  $d = 1,5$  мм,  $\varnothing = 16$  мм; 5 — коллиматор из алюминия

тектор составлен из двух литий-дрейфовых кремниевых, Дт 2 и Дт 3, толщиной  $\sim 2$  мм каждый, диаметром  $\sim 12$  мм. Третий детектор Дт 4, литий-дрейфовый, имеет толщину  $\sim 1,5$  мм, диаметр  $\sim 16$  мм.

В системе газоразрядных счетчиков, Дт 5 и Дт 6, используется тип СИ19БГ, что позволяет снизить фон от галактических космических лучей до 1—2 имп./с. Алюминиевая фольга толщиной 50—70 мкм на окне счетчика Дт 5 определяет энергетический порог регистрации электронов и протонов. Минимальный энергетический порог для Дт 6 определяется толщиной окна счетчика ( $\sim 1,1$  мг/см<sup>2</sup>) и дополнительной потерей электронами энергии при рассеянии ( $\sim 10$ —15%).

Основные физические характеристики счетчиков блока А даны в таблице.

Функциональная схема приведена на рис. 2. Сигналы выходов детекторов поступают на усилители и затем на амплитудные дискриминаторы.

Электрический порог дискриминатора, связанного с каналом Дт 1 ( $\frac{dE}{dx}$ ), на-

строен на регистрацию импульсов от протонов с энергиями  $> 0,5$  МэВ.

Импульсы, возникающие в канале составного детектора (Дт 2 + Дт 3), обусловлены прохождением электронов, полностью поглощенных в толщине детектора. После усиления импульсы поступают в амплитудный анализатор на интегральных дискриминаторах. Пороги амплитудных дискриминаторов обеспечивают следующие энергетические диапазоны для регистрируемых электронов: 0,2—0,6; 0,6—0,9; 0,9—1,2; 1,2—2,0 МэВ. Схема антисовпадений отделяет импульсы электронов указанных энергий в счетчиках Дт 1 (Дт 2 + Дт 3) от фона протонов с энергиями до 9 МэВ, а также от фона энергичных протонов ( $E_p > 30$  МэВ) и электронов ( $E_e > 2$  МэВ).

Протоны с энергиями  $E_p = 0,5$ —9,0 МэВ регистрируются с выхода схемы совпадений, на которую подаются импульсы от Дт 1 и от (Дт 2 + Дт 3). Наличие импульсов в Дт 4 выше порога дискриминации соответствует регистрации протонов с энергиями  $> 30$  МэВ и электронов с энергиями  $> 2$  МэВ. Импульсы, сформированные в блоке А, поступают в блок Б для пересчета и последующей передачи на телеметрию. Для счета числа импульсов в блоке Б используются линейные регистры (ЛР), собранные на интегральных схемах, составляющие цифровые каналы. Каждый цифровой канал в зависимости от ожидаемой нагруз-

Тип детектора	Энергия регистрируемых частиц, МэВ		Угловая апертура, град	Геомет. фактор, см <sup>2</sup> ·ср	Защита в телесном угле, г/см <sup>2</sup>	Боковая защита, г/см <sup>2</sup>
	электроны	протоны				
<i>n-p</i> -детекторы (Дт 1 + Дт 2 + Дт 3)	—	0,5—9,0	20	10 <sup>-1</sup>	1,2·10 <sup>-2</sup>	2,7
<i>n-p</i> -детекторы (Дт 2 + Дт 3)	0,2—0,6 0,6—0,9 0,9—1,2 1,2—2,0	— — — —	20	10 <sup>-1</sup>		2,7
<i>n-p</i> -детектор Дт 4 СИ19БГ	>2,0	>30,0	20	10 <sup>-1</sup>	0,92	2,7
Дт 5 СИ19БГ	>0,1	>2,0	46	4·10 <sup>-2</sup>	0,002	0,81
Дт 6	>0,04	>0,5	46	4·10 <sup>-2</sup>	0,002	0,81

ки имеет собственную структуру — предварительное и опрашиваемое число триггеров. На цифровые каналы выводится 9 параметров. Два линейных регистра, считывающих импульсы с газоразрядных счетчи-

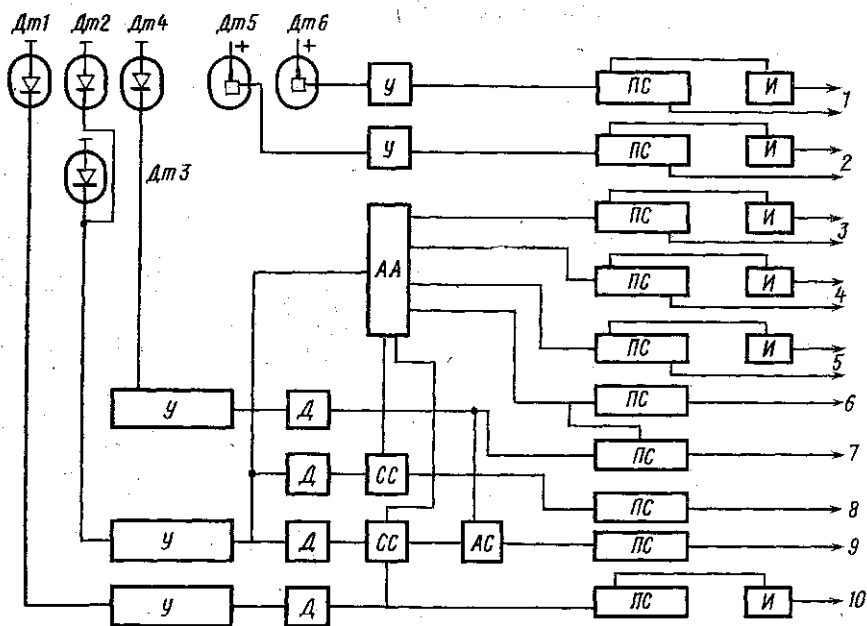


Рис. 2. Блок-схема прибора. У — усилитель, Д — дискриминатор, АА — амплитудный анализатор, СС — схема совпадений, АС — схема антисовпадений, ПС — пересчетная схема, И — интегриметр. 1 —  $E_e \geq 0,04$  МэВ; 2 —  $E_e \geq 0,1$  МэВ; 3 —  $E_e = 0,2-0,6$  МэВ; 4 —  $E_e = 0,6-0,9$  МэВ; 5 —  $E_e = 0,9-1,2$  МэВ; 6 —  $E_e = 1,2-2,0$  МэВ; 7 —  $E_e \geq 2$  МэВ; 8 —  $E_p \geq 30$  МэВ; 9 —  $E_e \geq 0,3$  МэВ; 10 —  $E_p \geq 0,5$  МэВ

ков, обеспечивают регистрацию в диапазоне скоростей счета от  $N_{\min} \sim 1$  имп./с до  $N_{\max} \sim 10^4$  имп./с; четыре регистра, на которые выведены параметры, поступающие с телескопа, — от 1—2 до  $2 \cdot 10^5$  имп./с;

три регистра, пересчитывающие протонные события — от 0,01 до  $10^4$  имп./с.

Одновременно с линейными регистрами в ряде счетных каналов функционируют в непрерывном режиме логарифмические интенсиметры. Для расширения динамического диапазона регистрации интенсиметры включаются после предварительного числа триггеров ЛР, формируя аналоговые каналы. Импульсы, возникающие при прохождении протонов с энергиями  $E_p > 0,5$  МэВ в канале Дт 1  $\left(\frac{dE}{dx}\right)$ , считаются в аналоговом канале.

При регистрации электронов в космическом пространстве в ряде случаев потоки протонов намного превышают по интенсивности потоки

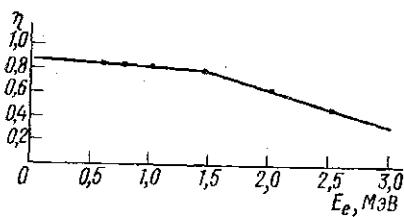


Рис. 3. Эффективность регистрации электронов

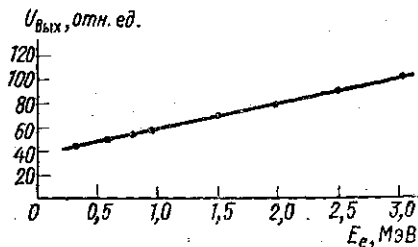


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала от энергии падающих электронов:  $U_{\text{вых}} = kE_e$

электронов. В этом случае доля ложных срабатываний определяется прежде всего разрешающим временем схемы, которое составляет 0,15 мкс. Если плотность потока протонов на 4 порядка превышает плотность потока электронов, то регистрируемый спектр электронов содержит не более 5% протонных событий. Истинный энергетический спектр электронов и протонов определяется из наблюдаемого путем учета эффективности регистрации  $\eta$ . Более подробно вопросы градуировки детекторов рассматриваются в [4].

Эффективность регистрации определяется в основном вероятностью полного поглощения в толщине двух детекторов (Дт 2+Дт 3),  $d \sim 4$  мм, составляющих общую систему, установленных друг под другом и включенных параллельно. Проводилась калибровка спектрометра при помощи радиоактивных источников  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  на  $\beta$ -спектрометре с углом фокусировки  $\pi\sqrt{2}$ . Следует отметить, что эффективность регистрации электронов с энергией  $E_e > 1,7$  МэВ значительно уменьшается из-за относительно небольшой толщины (4 мм) детектора (Дт 2+Дт 3), так как с увеличением энергии возрастает доля электронов, пролетающих его насквозь. Зная функцию распределения детектора, можно определить эту эффективность:

$$\eta(d, E, E') = \int_{E'}^{\infty} F(d, E, E') dE' \quad (1)$$

Детекторы (Дт 2+Дт 3) облучались моноэнергетическим пучком электронов с энергиями 0,6; 0,8; 1,0; 2,0; 2,5 МэВ. На рис. 3 приведена эффективность регистрации телескопом электронов различных энергий.

Проводилась также проверка линейной зависимости выходного сигнала от энергии падающих электронов. Сигнал снимался с основно-

го усилителя и подавался на амплитудный анализатор. Номер канала определялся по пику полного поглощения. Детекторы Дт 2, Дт 3 облучались моноэнергетическим пучком электронов на  $\beta$ -спектрометре в диапазоне энергий 0,2—3,0 МэВ. Полученная зависимость  $U_{\text{вых}} = kE_e$  приведена на рис. 4. Спектрометр применялся на спутнике Земли серии «Интеркосмос».

Авторы признательны Ю. И. Логачеву, С. Н. Кузнецову за ценные советы; Л. А. Смирнову и Ю. П. Гордееву за помощь в изготовлении и испытании аппаратуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винклер Дж. Тр. междунар. семинара по исследованию космического пространства. Л., 1969, с. 133—158. 2. Вакулов П. В., Коврыгина Л. М., Минеев Ю. В., Тверская Л. В. Динамика энергичных электронов радиационных поясов Земли во время магнитных бурь.—Изв. АН СССР. Сер. физ. 1976, 40, № 3, с. 502—509. 3. Минеев Ю. В., Савенко И. А., Савельев В. Г., Спирькова Е. С. Изучение электронов с энергиями 0,3—3 МэВ на спутнике «Прогноз-4».—Геомagnetизм и астрономия, 1978, 18, № 2, с. 203—206. 4. Алексеев Н. В., Вакулов П. В., Коврыгина Л. М., Минеев Ю. В., Щербовский Б. Я. Полупроводниковый спектрометр электронов для исследований в космосе.—Косм. исследования, 1974, 12, № 2, с. 301—304.

Поступила в редакцию  
27.02.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1981, т. 22, № 1

УДК 551.466.4

Г. Е. КОНОНКОВА, К. В. ПОКАЗЕЕВ, Л. Л. ТАРАСОВ

## ВЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ТЕЧЕНИЯХ

При радиофизических методах исследования морской поверхности большую роль играют волны сантиметрового диапазона. Взаимодействие этих волн с длиннопериодными компонентами волнения и течения изменяет существенно как характеристики волн, так и характер отраженного радиосигнала. В реальных морских условиях может наблюдаться ситуация, когда ветровые волны сантиметрового диапазона генерируются ветром на течениях, созданных орбитальными движениями длиннопериодных компонент волнения или течениями другого происхождения. Эксперименты показали, что процесс генерации ветровых волн сантиметрового диапазона на спутных течениях (направление течения совпадает с направлением распространения волн) имеет некоторые особенности по сравнению с процессом генерации ветровых волн без течения [1].

В данной работе выполнено экспериментальное исследование процесса генерации ветровых волн при малых разгонах на спутном и встречном течениях. Эксперимент поставлен в гидродинамическом лотке, который был оборудован съемной крышей и вентиляционной установкой для создания ветровых волн. Используемая часть лотка имела следующие размеры: высота 0,5 м, ширина 0,6 м, длина 7,5 м. Скорость течения измерялась микровертушкой X-10, скорость воздушного потока — нестандартной микровертушкой, ветровые волны — струнным