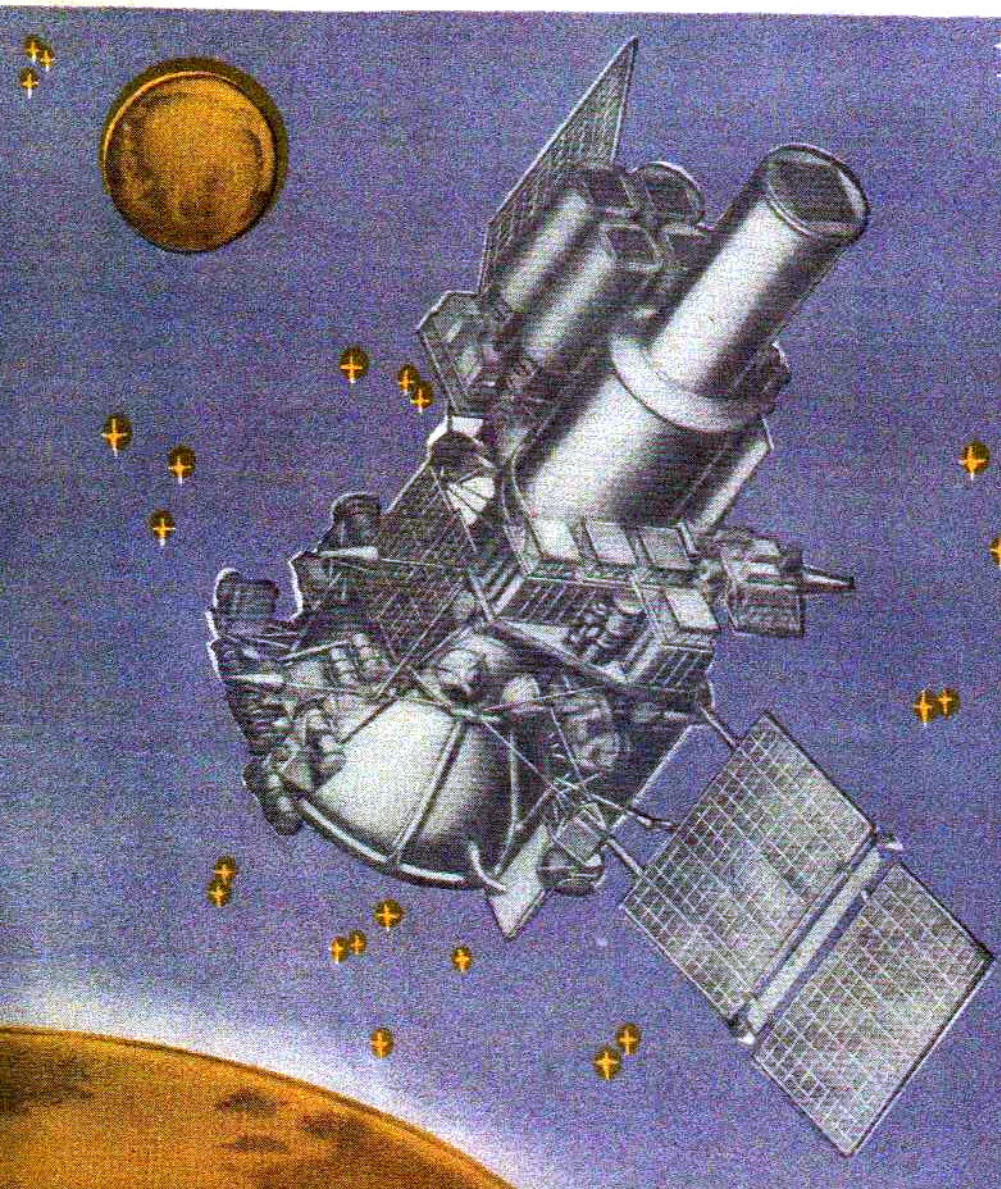


АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА



Аппаратура и методы исследования космического пространства. — М.: Наука, 1989. — 237 с.

ISBN 5-02-000040-X

В сборнике описана аппаратура для исследований в области физики космической плазмы, астрофизики высоких энергий, физики планет и планетных атмосфер. Научные приборы и комплексы, а также методы их разработки и испытания в наземных лабораториях и на специальных стендах были созданы в самое последнее время для крупнейших международных проектов, осуществляемых на космической станции "Фобос" и астрофизическом модуле "Рентген" пилотируемой станции "Мир", а также для планируемого в самое ближайшее время запуска астрофизической обсерватории "Гранат". Значительная часть из них создается или уже работает впервые. Эта аппаратура создавалась ИКИ АН СССР совместно с другими институтами АН СССР и ведомственными организациями при участии разработчиков широкой международной кооперации.

Сборник обобщает богатый опыт научного космического приборостроения и рассчитан на научных и инженерно-технических работников специального и широкого профиля, а также студентов и аспирантов.

Instruments and methods for space studies. — М.: Nauka, 1989.

This book describes the instrumentation for studying space plasma physics, astrophysics of high energies, physics of planets and planetary atmospheres. Scientific instruments and systems as well as methods for their development and testing in ground-based laboratories with specially designed stands have been engineered in the last few years for the largest International Projects: the PHOBOS space station, the RENTGEN astrophysical module on the MIR station, and the GRANAT astrophysical observatory planned to be launched in the immediate future. A major part of these instruments are now in the making or the operation for the first time. The Space Research Institute, USSR Academy of Sciences has generated the instrumentation in collaboration with other institutes of the USSR Academy of Sciences and state agencies with the participation of specialists from the countries involved in the wide international cooperation.

The book generalizes a wealth of experience in space instrument engineering; and scientists, engineers, research fellows and students will find authoritative accounts in the chapters with which they are most closely concerned.

Редакционная коллегия:

*В.М. Балабанов (отв. редактор),
Р.А. Сюняев, Т.К. Бреус, Э.В. Воронцов*

Рецензенты:

*доктор физико-математических наук Н.П. Данишкин,
доктор физико-математических наук профессор А.М. Гальпер*

А 3500000000-470
055 (02)-89 738-89, кн. 2

© Институт космических исследований АН СССР, 1989

ISBN 5-02-000040-X

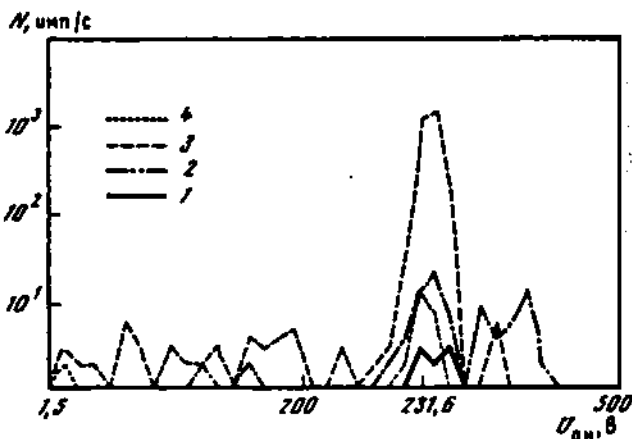


Рис. 4. Изменения выходной скорости счета (N , имп/с) в зависимости от анализирующего напряжения для четырех анодов

Электронный поток падал под углом $\alpha = 14^\circ$; $\bar{\alpha}$: 1 — 34° ; 2 — 11° ; 3 — 11° ; 4 — 34°

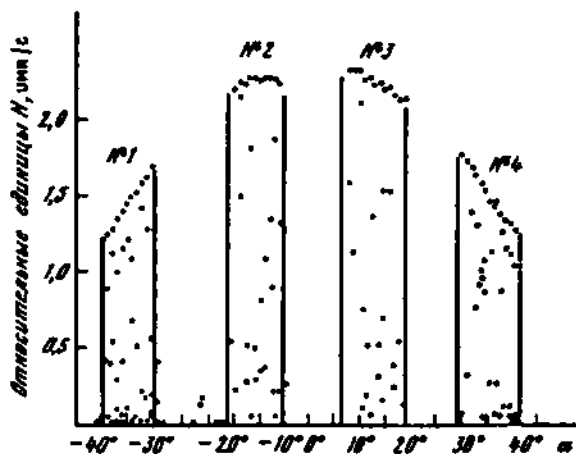


Рис. 5. Угловая диаграмма для первого датчика

направлений $\approx 11 \times 10^\circ$. Потенциал входного электрода может изменяться в пределах от $+20$ до -20 В, что расширяет возможности прямых измерений электронов солнечного ветра независимо от потенциала космического аппарата.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- МКП — микроканальная пластина
- ВВУ АН — высоковольтное устройство анализирующих электродов
- Н-ВЭ — напряжение входного электрода
- ВВУ-УН — высоковольтное устройство ускоряющего напряжения
- ВВУ-МКП — высоковольтное устройство питания МКП

| | |
|---------|---|
| ЦАП-АН | — цифроаналоговый преобразователь анализирующих напряжений |
| ЦАП-НВЭ | — цифроаналоговый преобразователь напряжения входного электрода |
| Т | — таймер |
| ПУ | — пересчетное устройство |
| СВВУ | — согласующее входное/выходное устройство |
| К-ЭИ | — калибровочный электронный источник |
| УКУ | — устройство калибровки зарядочувствительных усилителей |
| СВУ | — служебное вспомогательное устройство |
| ЗЧУ | — зарядочувствительный усилитель |
| П | — питание |
| Н | — нагреватель |

ЛИТЕРАТУРА

1. Hays P.B., Nady A.F. // Planet and Space Sci. 1973. Vol. 21. P. 1301–1306.
2. Pflido G., Eshelman V.R. // Ibid. 1968. Vol. 16. P. 1035–1059.
3. McEroy M.B., Connell J.C. // J. Geophys. Res. 1971. Vol. 76. P. 6674–6690.
4. Hays P.B., Sharp W.E. // Ibid. 1973. Vol. 78. P. 1153.
5. Shyn T.W., Sharp W.E., Hays P.B. // Rev. Sci. Instrum. 1976. Vol. 43, N 9. P. 1005–1015.
6. Sharp W.E., Hays P.B., Culter J.R., Dobbs M.E. // Ibid. 1981. Vol. 52, N 2. P. 256–261.

УДК 520.662.07:523.62.726:629.76

*Х. Грюнвальд¹, К. Грингауз², Б. Вилкен¹, И. Аксфорд¹,
К. Бекер¹, М. Веригин³, Г. Владимирова³, Ф. Глим³,
Л. Денщикова³, Х. Динсе³, П. Кураи⁴, И. Клименко²,
А. Ремизов², В. Ридлер⁵, В. Риех³, А. Рихтер¹,
Х. Розенбауэр¹, Ш. Салаи⁴, К. Сеге⁴, К. Швайнгеншу⁵,
Р. Шмидт¹, М. Штеллер⁵*

ЭНЕРГО-ЗАРЯДО-МАСС-СПЕКТРОМЕТР СОВИКОМС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ КОМПОНЕНТОВ ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ И В ОКОЛОМАРСИАНСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ С БОРТА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ "ФОБОС-1, -2"

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исторически сложилось, что в исследованиях космической плазмы анализ ионов по величине отношения их энергии к заряду E/q стал традиционным путем, на котором выявлены физически плодотворные связи между различными плазменными компонентами. Хотя пионерские работы в этой области и смогли привести к новому уровню понимания на основе

¹ Институт аэронавтики о-ва М. Планка, ФРГ.

² Институт космических исследований АН СССР.

³ Технический университет Брауншвейга, ФРГ.

⁴ Центральный институт физических исследований, ВНР.

⁵ Институт космических исследований Австрийской АН.

прямых измерений как в сверхзвуковом потоке межпланетной плазмы, так и в условиях широких энергетических распределений в окрестности планет, этот уровень был достигнут без какого-либо разделения различных ионных составляющих. Однако с более детальным знанием закономерностей в межпланетной и околопланетной плазме выяснилась важность информации об ионном составе как ключе к более ясному их пониманию (см., например, [1, 2]).

В солнечном ветре приблизительное равенство переносной скорости различных ионов, достаточно надежно обоснованное теоретически и экспериментально, при определенных условиях дает возможность интерпретировать E_i/q спектры как массовые m_i/q спектры. В то же время, хотя имеется много примеров успешной применимости такого приближения, условия его использования часто нарушаются — или предположение о равенстве переносных скоростей становится не только недостаточно точным, но даже приводящим к ошибочным выводам, или тепловой разброс приводит к наложению различных m_i/q компонентов плазмы и E_i/q спектр не поддается сколько-нибудь однозначной интерпретации. Необходимым следствием этого является требование включения в плазменные эксперименты анализа по m_i/q . Однако до настоящего времени даже такой анализ применялся в весьма небольшом числе случаев [3–5].

В ряде случаев и сортировки ионов по m_i/q недостаточно, чтобы избежать ошибочной или существенно неопределенной интерпретации данных плазменного эксперимента, и необходима информация отдельно о массе и заряде входящих ионов. Например, в солнечном ветре вклад в m_i/q спектр при фиксированном отношении $m_i/q = 4$ могут дать ионы в широком диапазоне массовых чисел от He^+ , O^{++} , Si^{7+} до Ca^{10+} и Fe^{14+} . Эта неопределенность уже касается ключевого вопроса о сущности физических процессов в источнике солнечного ветра и солнечной короне, поскольку отдельная регистрация некоторых из вышеупомянутых ионов может дать решающие свидетельства о процессах в этих областях.

Еще сложнее ситуация с плазменными измерениями в области взаимодействия солнечного ветра с Марсом, где, кроме ионов солнечного ветра, могут присутствовать ионы, происходящие из марсианской атмосферы. Состояние плазмы в этой области еще более неравновесно, чем в солнечном ветре: с близкими значениями m_i/q и E_i/q могут присутствовать ионы различных масс, различного происхождения, поток которых различным образом изменяется вдоль орбиты спутника.

Эксперимент СОВИКОМС на борту КА "Фобос" основывается на использовании энерго-зарядо-масс-спектрометра ионов с их предварительным ускорением до 30 кэВ для раздельного измерения энергетических спектров ионов в различных массовых и зарядовых группах. Полученные в ходе его выполнения экспериментальные данные должны обеспечить решение или дать полезную информацию для решения следующих задач:

исследование массового и зарядового состава малых компонентов солнечного ветра;

исследование процессов ускорения солнечного ветра на основе совместного анализа динамических характеристик его различных малых составляющих, свойств электронного компонента плазмы в солнечной короне (по зарядовому распределению ионов) и месте наблюдения.

уточнение и детализация связи между источником солнечного ветра и местом его наблюдения на основе идентификации потоков солнечного ветра, происходящих из различных областей короны;

исследование изменения гидродинамических параметров малых компонентов (пробные частицы), гидродинамических и кинетических параметров протонов и α -частиц солнечного ветра (совместно с ТАУС) в окрестности межпланетных ударных волн и других разрывов;

исследование структуры, динамики и состава марсианской магнитосферы, роли тяжелых ионов в формировании магнитопаузы, процессов ускорения в ареомагнитном хвосте;

изучение возмущений солнечного ветра в окрестности Фобоса и, возможно, в следе Деймоса.

До полета КА "Фобос" эксперименты такого класса, позволяющие определять массу m_i , заряд q и энергию E_i каждого отдельно взятого иона, проводились только в земной магнитосфере с помощью прибора MICS на шведском полярном спутнике "Викинг" [6] и прибора CHEM на европейском спутнике AMPTE/CCE [7], попадавшем иногда в переходную область за фронтом околоземной ударной волны. Поскольку внеклиптический космический аппарат ULYSSES с аналогичным по принципу работы экспериментом SWICS [8] еще не запущен, эксперимент СОВИКОМС на КА "Фобос" может быть первым, в котором проводятся измерения энергетических спектров ионов с различной массой и зарядом в солнечном ветре и в окрестности Марса.

2. СОСТАВ И РАЗМЕЩЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА НА КА

Энерго-зарядо-масс-спектрометр СОВИКОМС состоит из расположенных вне гермоотсека двух блоков — собственно спектрометра и управляющего им блока электроники ДПУ-А (этот блок обслуживает также работу эксперимента ТАУС [9]). Блок ДПУ-А расположен на корпусе КА, а сам спектрометр укреплен на балке солнечной панели СП (рис. 1). Такое расположение спектрометра неблагоприятно с точки зрения теплового режима, однако вызвано необходимостью обеспечения широкого углового обзора датчика. Даже в этом случае возможно иногда частичное затенение на несколько градусов поля зрения прибора во время разворотов направленной антенны А космического аппарата.

Кроме того, спектрометр СОВИКОМС повернут на 5° относительно направления на Солнце в сторону движения КА для компенсации абберационного угла прихода ионов солнечного ветра за счет движения космического аппарата.

3. ПРИНЦИП РАБОТЫ СПЕКТРОМЕТРА

На рис. 2 схематически показаны основные элементы энерго-зарядо-масс-спектрометра СОВИКОМС.

На первом этапе ионы, попадающие в апертуру прибора, селективируются по E_i/q при помощи ионно-оптической системы, состоящей из двух квадрупольных линз L_1 , L_2 и полусферического электростатического анализатора ЭА. Линза L_1 фокусирует в одной плоскости ионы, приходящие в

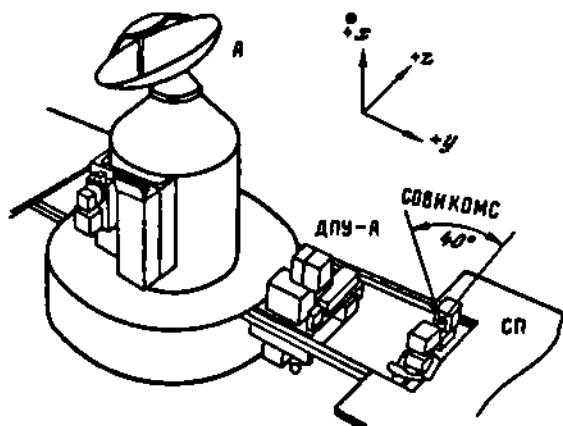


Рис. 1. Размещение энерго-зарядо-масс-спектрометра СОВИКОМС и блока электроники ДПУ-А на КА "Фобос"

Ось x — из Солнца, y — в направлении, противоположном направлению движения КА

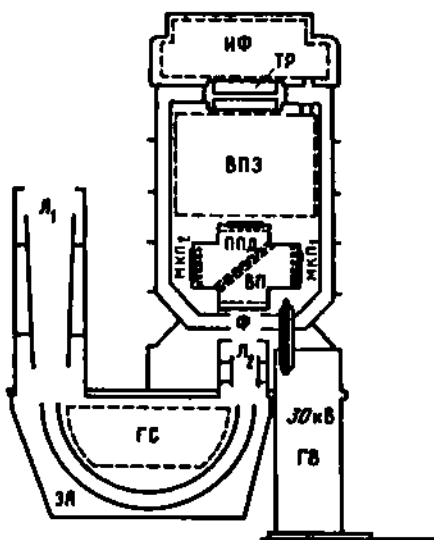


Рис. 2. Схема устройства энерго-зарядо-масс-спектрометра СОВИКОМС

пределах 20° от направления ее оси, обеспечивая тем самым их прохожде-ние через ЭА. Линза L_2 преобразует пучок ионов, прошедших через ЭА, в слаборасходящийся пучок, необходимый для уменьшения разброса вре-мен пролета этих ионов через времяпролетное устройство ВП (рис. 2).

Переменное биполярное ступенчатое напряжение, необходимое для рабо-ты ионно-оптической системы, создается генератором ГС. Перед входом в ВП ионы дополнительно ускоряются постоянным потенциалом $\varphi_0 < 30$ кВ, создаваемым генератором высокого напряжения ГВ.

Таким образом, во времяпролетное устройство ионы попадают с энер-гией $E_i + q\varphi_0$, достаточной для того, чтобы ее потери при прохождении угольной фольги Ф были сравнительно малы. Время пролета этих ионов через измерительный промежуток ВП длиной $d \approx 7$ см регистрируются по задержке между старт- и стоп-импульсами, создаваемыми в микроканаль-

ных пластинах МКП_{1,2} вторичными электронами с Ф и с полупроводникового детектора ППД соответственно (рис. 2). Кроме этого, измеряется также энергия E_m , выделяемая ионами в ППД.

Упомянутые выше измерения позволяют для каждого зарегистрированного спектрометром иона определить его массу и заряд. В упрощенном виде выражения для оценки этих характеристик иона можно записать следующим образом:

$$m_i = 2E_m / (\alpha (\tau/d)^2), \quad m_i/q = 2(E_i/q + u_n - E_i'/q)(\tau/d)^2, \quad (1)$$

где α — ядерный дефект ППД и E_i' — потери энергии иона в угольной фольге Ф.

Кроме ВП, под высоким напряжением u_n находится также блок электроники ВПЭ, генерирующий напряжения, необходимые для работы МКП_{1,2} и ППД (см. рис. 2). Этот же блок обеспечивает оцифровку значений τ и E_m с разрешением 10 бит. Значения τ , E_m , а также скорость счета МКП₁, ППД, скорость счета двойных (МКП₁ и МКП₂) и тройных (МКП₁, МКП₂ и ППД) совпадений по линии оптической связи ОС передаются через высоковольтный промежуток на блок ИФ, служащий интерфейсом энергоспектрометра с ДПУ-А. Мощность, необходимая для работы находящейся под высоким напряжением электроники, передается в ВПЭ с помощью керамического трансформатора ТР (см. рис. 2).

В блоке ВПЭ имеется также специальная схема, позволяющая по τ и E_m в реальном масштабе времени определять, является ли зарегистрированный ион протоном или ионом He. Скорость счета таких событий также передается в ДПУ-А через ИФ, а соответствующие значения E_m и τ исключаются из дальнейшего анализа.

4. АНАЛИЗ И СЖАТИЕ ПОТОКА ИНФОРМАЦИИ

Предельные допускаемые прибором значения описанных в предыдущем разделе различных скоростей счета $\approx 2,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ соответствуют достаточно большому начальному потоку информации $\leq 5 \cdot 10^6$ бит/с, что на много порядков величин превосходит выделенную для эксперимента СОВИКОМС среднюю информативность ≈ 10 бит/с по трассе полета и ≈ 200 бит/с в околопланетном режиме.

Однако и внутри эксперимента блок ДПУ-А может идентифицировать только $\leq 2 \cdot 10^4$ ион/с, что соответствует потоку информации $\leq 4 \cdot 10^5$ бит/с. Именно поэтому протоны и ионы He исключаются из дальнейшего анализа в эксперименте СОВИКОМС, предназначенном для исследования малых, более тяжелых компонентов межпланетной и околомарсианской плазмы. Для остальных ионов первой операцией в блоке ДПУ-А является определение их массы и отношения m_i/q .

Непосредственно воспользоваться для этой цели выражениями (1) не представляется возможным, поскольку входящие в него параметры E_m и E_i являются нелинейными функциями массы и энергии ионов, зависящими от свойств конкретно примененных в приборах угольной фольги и ППД. Поэтому для каждого экземпляра прибора его ВП калибровалось в пучках ионов различной массы и энергии. В качестве примера на рис. 3 представлена калибровочная зависимость τ от энергии иона на входе ВП для прибора, установленного на КА "Фобос-1". Очевиден степенной ход

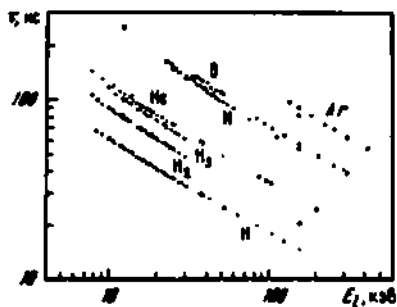
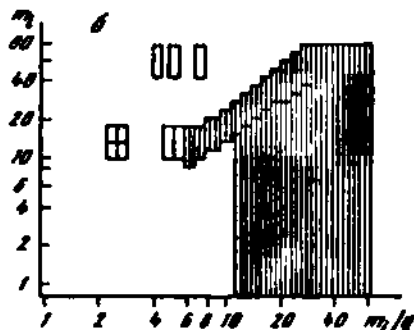


Рис. 3. Зависимость времени пролета различных ионов через ВП от их энергии для экземпляра СОВИКОМС на КА "Фобос-1" по результатам калибровки

Рис. 4. Группы матричных элементов, выбранные для передачи энергетических спектров ионов в солнечном ветре (а) и в окрестности Марса (б)



этой зависимости $E_i^{-1/2}$ при больших E_i и отличие от него при меньших E_i из-за увеличения роли потерь энергии в угольной фольге Ф.

Определенные на основе проведенных калибровочных работ зависимости аппроксимировались полиномами:

$$\ln m_i = \sum_{l,n} a_{l,n} x^l y^n, \quad \ln m_i/q = \sum_{l,n} b_{l,n} x^l y^n, \quad (2)$$

где $x = \ln E_m$, $y = \ln \tau$, $z = \ln(E_i/q + u_0)$. Из физических соображений разрешение по $\ln m_i$ было ограничено 32 уровнями этого параметра (5 бит) и по $\ln m_i/q$ — 128 уровнями (7 бит), что соответствует 4096 элементарным ячейкам в плоскости $(\ln m_i, \ln(m_i/q))$. Для прямого накопления зарегистрированных событий на каждом фиксированном значении E_i/q в принципе была бы необходима память 4096×24 бит $\approx 10^5$ бит, а для накопления событий при всех 128 значениях E_i/q — память объемом 12 Мбайт. Такой объем информации передать с борта КА "Фобос" с разумным временным разрешением невозможно. Поэтому в приборе СОВИКОМС было реализовано два подхода к отбору информации, передаваемой с борта КА, в зависимости от того, проводятся ли измерения в солнечном ветре или в окрестности Марса.

В солнечном ветре временной цикл измерений составляет 20 мин. За это время происходит сканирование по 104 более энергичным (из 128 возможных) уровням E_i/q в диапазоне энергий 0,16 – 30 кэВ/г.

При каждом сканировании запоминаются E_i/q спектры, соответствующие

шие 32 группам матричных элементов в плоскости ($\ln m_i$, $\ln(m_i/q)$), показанным на рис. 4, а. В спектре ионов O^{6+} (соответствующая ему группа матричных элементов заштрихована на рис. 4, а) ищется интервал E_i/q с наибольшими скоростями счета и оставляется только 14 уровней E_i/q в этом интервале. На основе предположения, что в солнечном ветре переносные скорости всех ионов близки, из остальных 31 спектров передается также 14 соответствующих энергетических уровней. Предусмотрены также варианты выбора передаваемых интервалов E_i/q по информации о скорости солнечного ветра с прибора ТАУС и по телекоманде.

В окрестности Марса временной цикл измерений составляет 1 мин. За это время сканируется 128 уровней E_i/q в диапазоне энергий 0,05–30 кэВ/г. Поскольку ожидается, что в этой области значительную роль играют однозарядные ионы, выбор групп матричных элементов (рис. 4, б) здесь другой, чем в солнечном ветре. В каждом цикле измерений на Землю передается 60 энергетических спектров, суммированных по восьми прилегающим E_i/q уровням в соответствующих группах матричных элементов.

Кроме этого, за цикл измерений передаются 248 матричных элементов ($\ln m_i$, $\ln(m_i/q)$) – матрицы, суммированные по E_i/q , и скорости счета ВП, суммированные по 8 прилегающим E_i/q уровням (за исключением скорости счета МПК, где суммирование идет по 2 прилегающим E_i/q уровням).

С учетом технологической информации о состоянии прибора в этом режиме работы СОВИКОМС на Землю ежеминутно передаются 12 блоков телеметрической информации по 120 байт.

Основные характеристики эксперимента

| | | |
|---------------------------|------------|---|
| Диапазон измерений | по E_i/q | 0,05–30 кэВ/г в 128 интервалах |
| | по m_i/q | 1–60 128 уровней |
| | по m_i | 1–60 32 уровня |
| Поле зрения прибора | | 40×40° |
| Геометрический фактор | | $4 \cdot 10^{-1}$ см ² · ср изотропный поток |
| | | 0,15 см ² направленный поток |
| Разрешение по E_i/q | | 7% |
| Диапазон измерений τ | | 20–500 нс |

ЛИТЕРАТУРА

1. Bame S.J. // Solar wind. 1972. NASA-SP-308. P. 535–538.
2. Getz J., Bockler P. // Solar wind Four. 1981. MPAE-W-100-81-31. P. 403–413.
3. Ogilvie K.W. et al. // Rev. Sci. Instr. 1968. Vol. 39. P. 441.
4. Balster H. et al. // Space Sci. Instr. 1976. Vol. 2. P. 499.
5. Bockler P. // Solar wind Five. 1983. NASA SP-2280. P. 613–622.
6. Studeman W. // Geophys. Res. Lett. 1987. N 4. P. 455–458.
7. Krueger W. et al. // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. N AS. P. 4459–4466.
8. Gloeckler G. et al. // International Solar Polar Mission. Paris, 1983. P. 75–103.
9. Розенбаум Г. и др. Наст. сб. С. 30.