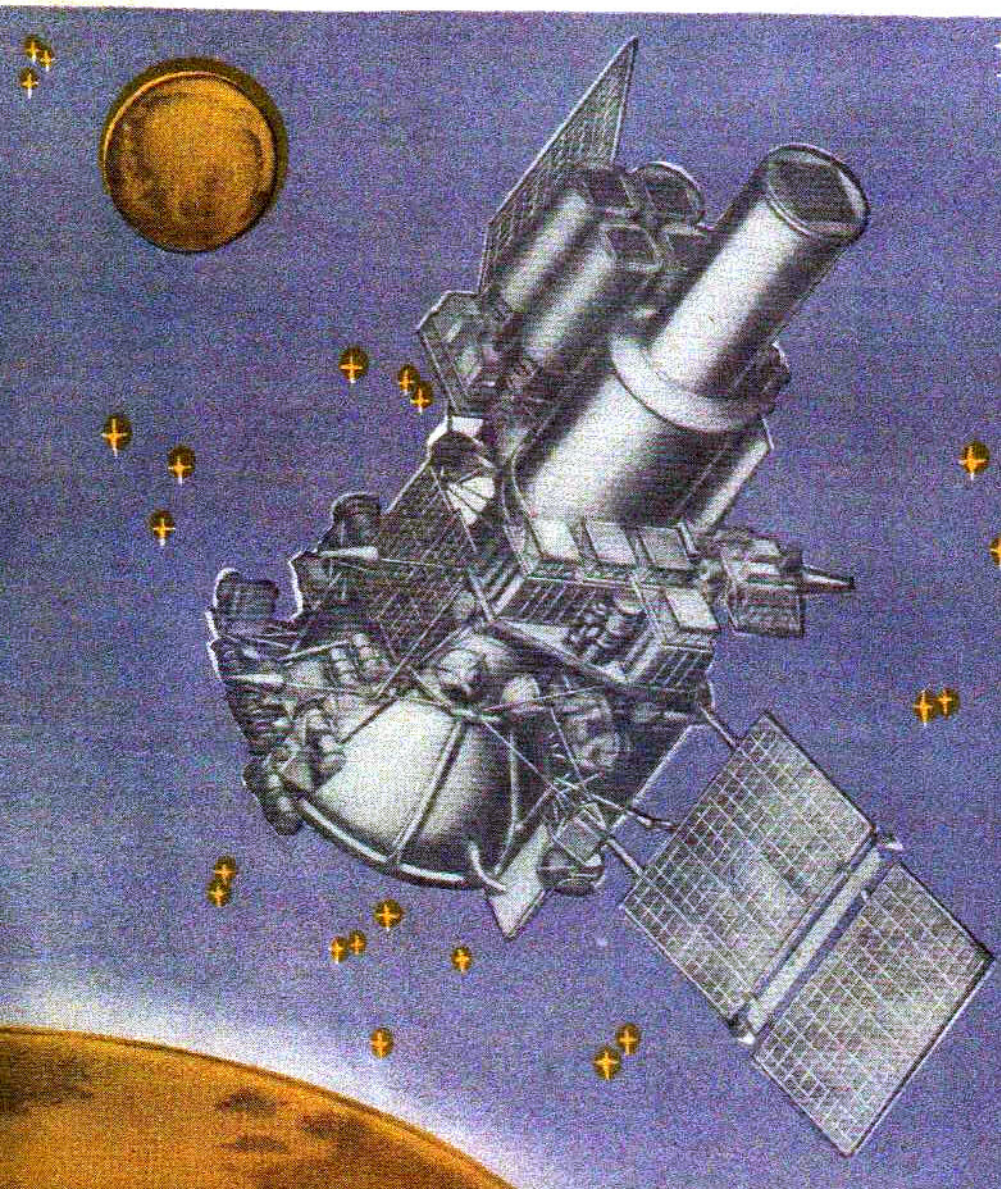


АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА



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 испытаний 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. Балебанов (отв. редактор),
Р.А. Сюняев, Т.К. Бреус, Э.В. Воронцова

Рецензенты:

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

*Г. Розенбауэр¹, Н. Шютте², И. Анати¹, М. Веригин²,
А. Галеев², К. Грингауз², А. Ремизов³, А. Ридлер³,
К. Сёзе⁴, П. Хеммерих¹, К. Швингеншу³, М. Штеллер³*

ИЗУЧЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСНОВНЫХ ИОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА: ПРОТОНОВ И АЛЬФА-ЧАСТИЦ В ПРОЕКТЕ "ФОБОС". ЭКСПЕРИМЕНТ ТАУС (КОМПЛЕКС МПК)

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Изучение ионов солнечного ветра — потока заряженных частиц, непрерывно вытекающего из солнечной короны, относится к числу актуальных проблем исследования Солнца и эффектов взаимодействия солнечного ветра с планетами. Чтобы понять причины существования короны, ее расширения и нагрева, механизмы ускорения солнечного ветра и пр., необходимо знать параметры солнечного ветра, их временную и пространственную динамику.

Измерения параметров солнечного ветра осуществляются уже более двух десятилетий. Наиболее длительные и соответственно полные наблюдения были проведены на аппаратах HELIOS-1 и -2 [1], GIOTTO — спутнике AMPTE [2].

В работе [3] приведен обзор методов и приборов, использовавшихся различными группами исследователей для масс-спектрометрических измерений космической плазмы. Во всех этих приборах, основанных на различных принципах действия и отличающихся своими основными параметрами: полем зрения, угловым разрешением, энергетическим диапазоном, геометрическим фактором, разрешением, анализ положительных ионов осуществлялся в соответствии с величинами отношение энергии к заряду (E/q) массы к заряду (M/q). Максимальная энергия измеряемых потоков частиц не превышала, как правило, 20 кэВ.

Современные приборы, предназначенные для точного определения параметров солнечного ветра, должны быть пригодны и для проведения исследований эффектов взаимодействия солнечного ветра с магнитосферами и атмосферами планет, наблюдений солнечного ветра на различных радиальных расстояниях, гелиодолготах и, что наиболее существенно, гелиошироотах. Поэтому чрезвычайно важно, чтобы применяемая аппаратура позволяла надежно разделять распределения протонов и α -частиц независимо от скорости и температуры солнечного ветра. Обычные электростатические анализаторы не позволяют разделить спектры протонов и α -частиц при высоких температурах плазмы и регистрировать трехмерные функции распределений протонов и α -частиц с высоким временным разрешением (менее 10 с). Такие измерения должны открыть новый класс исследова-

¹ Институт астрономии общества М. Планка, ФРГ.

² ИКИ АН СССР.

³ ИКИ, Австрия.

⁴ ЦИФИ АН ВНР.

ний солнечного ветра, который до сих пор не был обеспечен аппаратурой.

Четкое разделение протонов и α -частиц, которое можно реализовать комбинацией электростатического и масс-анализаторов, в сочетании с высокой чувствительностью позволит впервые исследовать высокоэнергичную часть протонных спектров и детальную структуру спектров α -частиц (трехмерные распределения) даже при высоких температурах солнечного ветра. Большинство ранее использовавшихся приборов, позволявших проводить анализ частиц солнечного ветра только по энергиям (E/q), не обеспечивали надежное выделение высокоэнергичных "хвостов" в распределениях протонов и α -частиц, особенно в случаях высоких температур.

Детальное исследование распределений протонов и α -частиц при высоких температурах плазмы представляет особый интерес, так как может быть использовано для изучения эффектов взаимодействий волна—частица, проявляющихся наиболее явно в горячем, высокоскоростном солнечном ветре, когда волновая активность высока, а термализация за счет кулоновских взаимодействий мала. Поскольку взаимодействия волна—частица решающим образом влияют на нарушение температурной изотропии, которую предсказывают простые гидромагнитные модели расширяющегося солнечного ветра, возможность независимого наблюдения различных частиц солнечного ветра в пространстве скоростей существенно расширит наше понимание различных микропроцессов, протекающих в солнечном ветре (и, вероятно, во многих других астрофизических плазмах).

Почти одновременные и точные измерения протонов и α -частиц при различных условиях солнечного ветра очень важны и потому, что волны оказывают разное воздействие на частицы с различными массами и зарядом. Поэтому наблюдения основных двух компонентов солнечного ветра позволят определить физическую природу воздействия волны на плазму солнечного ветра в межпланетном пространстве.

Высокое временное разрешение позволит детально исследовать высокочастотные волны, которые, по-видимому, играют основную роль в процессах взаимодействий волна—частица.

Следует отметить, что до сих пор измерения электрических и магнитных полей проводились с высоким временным разрешением, в то время как распределения частиц измерялись недостаточно быстро (более 40 с).

Измерения, сочетающие высокое временное разрешение с высокой чувствительностью, дадут возможность исследовать не только сверхтепловые распределения солнечной плазмы, но и изучать тангенциальные и вращательные разрывы в солнечном ветре, быстрые и медленные ударные волны, эффекты на границах магнитосфер, ионосфер и атмосфер небесных тел. Одновременные измерения энергетических распределений тяжелых ионов позволят расширить полноту исследований.

2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Прибор ТАУС позволяет измерять (почти одновременно и независимо) энергетические и угловые распределения ионов, т.е. получать информацию о трехмерных распределениях протонов и α -частиц по скоростям, а также об одномерных энергетических распределениях тяжелых ионов как в солнечном ветре, так и вблизи планеты Марс. По результатам зафиксиро-

ванной информации определяются моменты функции распределения (до третьего включительно) в реальном времени, что дает возможность получать сведения об основных параметрах космической плазмы: плотности, полной скорости, температуре, анизотропии температур, потоке тепла.

2.1. Метод измерений

Принцип работы прибора ТАУС показан на рис. 1. В верхней части рисунка изображено схематическое сечение, а в нижней — проекция траекторий протонов и α -частиц (кривая 1), которые попадают на входную щель прибора S_1 параллельно центру его поля зрения. Кривая 2 соответствует траектории частицы, пришедшей на вход прибора под углом 20° .

На рис. 1 видно, что в приборе для анализа по энергиям (E/q) и массам (M/q) имеются:

дефлектор D для расширения угловой диаграммы,

тордондальный электростатический анализатор A_1 для анализа частиц по энергиям (E/q),

полусферический электростатический анализатор A_2 , помещенный в радиальное магнитное поле \bar{B} , для анализа по массам M/q .

Анализаторы A_1 и A_2 устанавливаются таким образом, что входная щель анализатора A_1 (S_1) и его выходная щель (S_2), совпадающая с входной щелью анализатора A_2 , находятся на одной оси (см. рис. 1). Поле зрения такой системы анализаторов (практически не отличающееся от поля зрения единичного анализатора) в продольном направлении (α) составляет $\pm 20^\circ$.

Чтобы расширить угловую диаграмму прибора в поперечном направлении (β), на входе установлен дефлектор D , сканирование напряжения на котором позволяет увеличить угол зрения прибора в этом направлении до $\pm 20^\circ$.

Для согласования прохождения частиц различных масс через два анализатора A_1 и A_2 между выходом первого A_1 и входом второго A_2 они ускоряются в зазоре из цилиндрических сеток (АС) таким образом, что энергия частиц, проходящих через A_2 , всегда одна и та же (≈ 6 кэВ).

На выходе анализатора A_2 поток частиц, разделенный по энергиям E/q и массам M/q , попадает на вход щелей: S_3 — (α -частицы), S_4 — (протоны) и S_5 — (тяжелые ионы). Центры щелей S_3 и S_4 отстоят друг от друга только на 2 мм.

Пройдя выходные щели $S_3/S_4/S_5$, ионы тормозятся за счет потенциала на входе КЭУ ($U_{кэу} \approx 3$ кэВ).

Попав на наклонно установленную пластину C , падающий ионный поток протонов или α -частиц преобразуется в потоки вторичных электронов, которые регистрируются системой из 8 каналных электронных умножителей (в зависимости от угла падения α в азимутальном направлении). Девятый умножитель, расположенный на выходе анализатора A_2 , регистрирует потоки тяжелых ионов. Угловое расстояние между центрами каналотронов примерно $4,5^\circ$, что и определяет угловое разрешение прибора.

Протоны и α -частицы регистрируются в зависимости от E/q , углов β (азимутального) и α (продольного). Длительность измерительного цикла для каждого сорта частиц составляет 8 с.

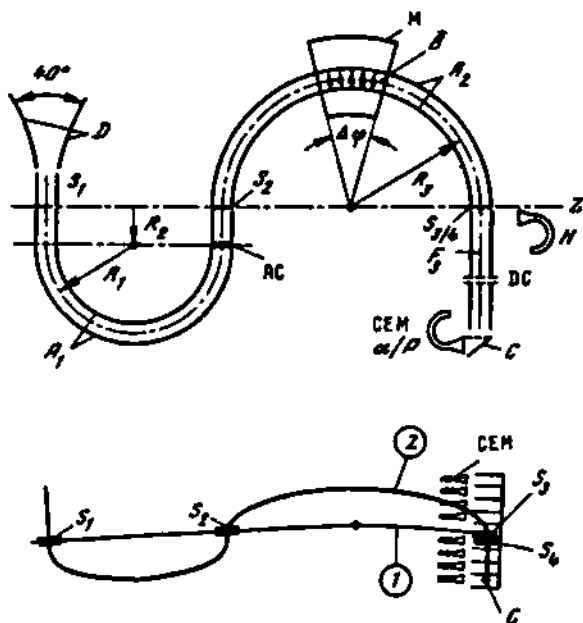


Рис. 1. Схема прибора (вверху). Проекция траекторий ионов (внизу)

Для каждого значения E/q последовательно (ступенями) сканируется напряжение на дефлекторных пластинках D , принимающего 8 фиксированных значений, что соответствует 8 положениям азимутального угла β_1, \dots, β_8 . Длительность ступени для каждого $\beta_i \approx 32$ мс, длительность измерений при каждом анализируемом значении энергий ≈ 250 мс. Соответственно время сканирования 32 энергетических ступеней — 8 с. За это время прибор позволяет получать информацию об энергоугловых распределениях заряженных частиц для 32 значений энергий и 8×8 значений углов (для углов α — одновременно, для β — последовательно).

Описанный цикл измерений аналогичным образом повторяется и для α -частиц с той лишь разницей, что из 32 энергетических ступеней выбирается только 8. Время экспозиции на каждой ступени увеличивается соответственно до 1 с, а для каждого угла β_i до ≈ 120 мс.

Тяжелые ионы регистрируются одновременно с регистрацией протонов или α -частиц девятым каналотроном в виде одномерных измерений только в зависимости от энергии E/q (интегрально в зависимости от β_i), т.е. при сканировании углов β_i все выходные сигналы при одном значении E/q суммируются, или в зависимости от β (интегрально от E/q).

Конструктивно датчик размещен в цилиндрическом корпусе вакуумно-герметичного исполнения, заполненного сухим азотом (на время проведения всех наземных испытаний), в атмосфере которого гарантируется сохранение параметров каналных электронных умножителей практически неизменными с течением времени. В нижней прямоугольной части корпуса размещен блок электроники.

2.2. Основные характеристики

Значения основных параметров прибора приведены ниже.

Масса	2,5 кг
Габариты	215 x 175 x 195 мм
Поле зрения	40 x 40°
Потребляемая мощность	4,4 Вт (макс.) 2,2 Вт (средн.)
Объем ТМ информации	По трассе: 13 блоков x 960 бит/20 мин, на припланетных орбитах: 12 блоков x 960 бит/1 мин
Измеряемые частицы	Протоны, α -частицы, тяжелые ионы
Принцип измерений	Электростатический и магнитный анализаторы
Диапазон энергий	150-6000 эВ (на трассе) 30-5330 эВ (вблизи планеты)
Разрешение по энергиям	7%
Разрешение по углам	5°
Длительность полного измерительного цикла (протоны и α -частицы)	16 с
Длительность измерительного цикла для частиц одного сорта	3 с
Временное разрешение	0,25 с (протоны), 0,95 с (α -частицы)
Динамический диапазон	6,5 · 10
Уровень фона	1 км/с

Измерения протонов и α -частиц осуществляются последовательно, наличие механического актюатора, перекрывающего поочередно выходные щели S_3 и S_4 , позволяет с очень высокой степенью надежности регистрировать протоны и α -частицы солнечного ветра независимо от его температуры и скорости.

Питание прибора ТАУС (27 В), управление, вывод выходных сигналов на телеметрию и частичная обработка результатов измерений осуществляются через блок БЭ-А.

Блок электроники включает:
источники низковольтных напряжений,

источники высоковольтных напряжений для питания дефлектора D_2 анализаторов (A_1 и A_2) и канальных электронных умножителей, обеспечения промежуточного ускорения (АС) и торможения (С) заряженных частиц (см. рис. 1),

зарядочувствительные усилители (9 шт.),

аналого-цифровые преобразователи (АЦП) для обеспечения контроля высоковольтных напряжений,

блок управления работой прибора,

блок контроля работы датчика и передачи информации в блок БЭ-А.

Блок-схема прибора представлена на рис. 2.

Поскольку управление прибором, частичная обработка его выходных сигналов и связь с ТМ системой осуществляются через прибор БЭ-А, все команды и синхросигналы с прибора БЭ-А поступают на входное согласующее устройство прибора ТАУС (ВСУ), а далее на схему внутреннего управления, на так называемый блок управления (БУ) и распределитель ко-

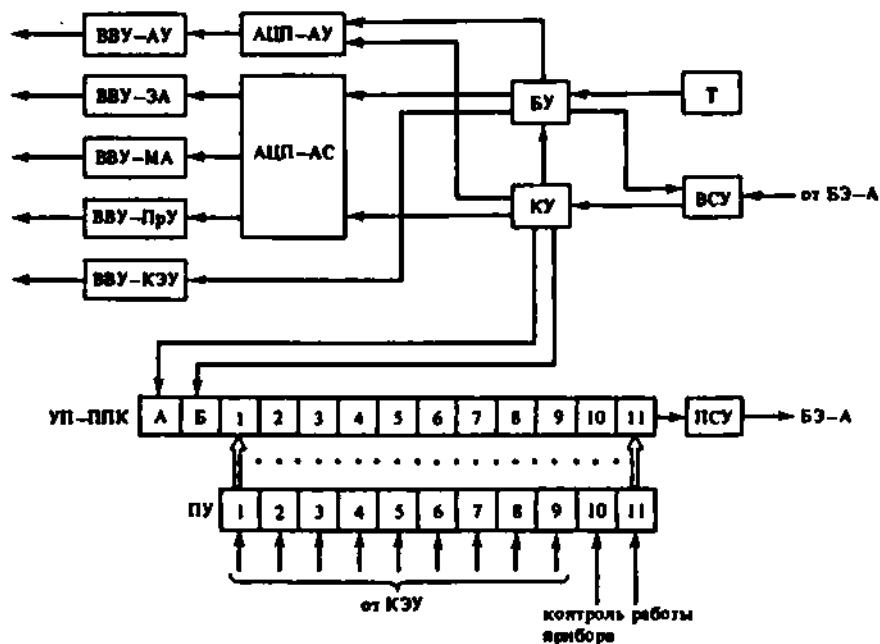


Рис. 2. Блок-схема

манд (или дешифратор) (КУ), которые имеют, в свою очередь, непосредственную связь с (ВСУ). Минимальный временной интервал поступления команд на вход прибора с блока БЗ-А ≈ 120 мс. Прибор ТАУС имеет и собственные внутренние часы — таймер (Т), посредством которого вырабатываются все необходимые временные режимы, длительность которых может быть и меньше 120 мс. А именно прибор БЗ-А определяет режим работы прибора: регистрация протонов или α -частиц (P/α) и номер энергетической ступени E/q (в стационарном режиме). Остальные временные режимы (независимо от их длительности) вырабатываются с помощью таймера Т.

Блоки КУ и БУ осуществляют управление аналого-цифровыми преобразователями (АЦП-АУ и АЦП-АС), блоками питания пластин дефлектора (так называемые азимутальные углы) (ВВУ-АУ), высоковольтными устройствами питания анализаторов (ВВУ-ЗА и ВВУ-МА), формирования напряжения промежуточного ускорения (ВВУ-ПрУ), питания канальных умножителей (ВВУ-КЗУ).

Для регистрации выходных сигналов канальных электронных умножителей (КЗУ) и осуществления контроля режима их работы, а также контроля режима работы других жизненно важных функциональных элементов прибора служит система из одиннадцати 16-битовых счетчиков (ПУ), информация которых запоминается и преобразуется из параллельного кода в последовательный с помощью тринадцати УП-ППК (см. рис. 2) и поступает на блок БЗ-А через передающее согласующее устройство ПСУ. Динамический диапазон каждого счетчика — $6,5 \cdot 10^6$. На вход счетчиков с 1-го

по 9-й поступает информация с выходов зарядочувствительных усилителей КЗУ, а на счетчики 10 и 11 — контрольные сигналы, характеризующие состояние высоковольтных и низковольтных источников питания и других служебных блоков. Эта служебная информация поступает первоначально в виде токового сигнала, преобразуемого в частоту. Характерно, что при наличии 11 счетчиков ПУ в приборе имеется 13 УП-АПК (А, В, 1211). УП-ППК, обозначенные как А и Б, связаны только с КУ и служат для передачи команд из БЭ-А, т.е. обеспечивают внутренний режим прибора.

На входе счетчиков ПУ № 1–9 имеются 4-позиционные электронные "ключи", с помощью которых задается режим работы прибора. В положении 1 — присоединены зарядочувствительные усилители КЗУ, регистрирующие потоки заряженных частиц. В положении 2 — КЗУ от пересчетных устройств отсоединены и проводится проверка правильности функционирования прибора ТАУС совместно с БЭ-А. Для этого от специального кварцевого генератора на вход девяти счетчиков подается опорная частота (при каждом значении E/q) в виде 4–5 различных значений на входы разных усилителей соответственно, что имитирует некий частотный спектр в зависимости от угла β_1 . Такие спектры регистрируются при всех значениях анализирующих ступеней E/q , кроме 17-й, для которой все подаваемые на вход счетчиков частоты удваиваются. Таким образом производится проверка правильности оценки блоком БЭ-А номера энергетической ступени, при которой имеет место максимальная скорость счета.

В положениях 3 и 4 на вход счетчиков поступают сигналы с ПУ № 10 и 11 соответственно, характеризующие режим работы и состояние высоковольтных устройств прибора и других потребителей, работоспособность которых целесообразно контролировать. Служебные ПУ № 10 и 11 в свою очередь, имеют на входе электронные "ключи" на три положения. Эти "ключи" позволяют одновременно измерять любое состояние только каких-либо двух "потребителей" и, следовательно, опросить соответственно 16 потребителей. Ключи ПУ № 10 и 11 управляются в стационарных условиях посредством блока БУ.

В случае необходимости в приборе предусмотрена возможность выбора любого номера энергетической ступени E/q , равно как и любого значения β_1 , по внешней команде с Земли через блок БЭ-А с помощью командного устройства КУ.

2.3. Режим работы прибора

Изначальный этап работы прибора начинается измерительным циклом регистрации протонов. За время цикла $T = 8$ с анализирующее напряжение E/q меняется ступенями 32 раза, при этом при каждом значении E/q также ступенями меняется напряжение на пластинах входного дефлектора D (число ступеней равно 8). Это означает, что для каждого значения E/q азимутальные углы β_1 в диапазоне $\pm 20^\circ$ принимают 8 различных значений. Данные о временах экспозиции и длительностях циклов измерений приведены в табл. 1.

Результаты измерений первого цикла не поступают на ТМ-систему, а используются для определения номера энергетической ступени, т.е. величины энергии, которой соответствует максимальная скорость счета (макс-

Таблица 1

Сорт частиц	Число углов β_i	Число энергетических ступеней E/q	Длительность измерений при одном β_i , мс	Длительность измерений при одном E/q , мс	Длительность полного измерительного цикла, с
Протоны	8	32	29,4	235,3	8
α -частицы	8	8	117,65	941,2	8
Тяжелые ионы	—	32	—	235,3	8
	8	—	941,2	—	8

Таблица 2

Наименование режима	Назначение	Длительность измерительного периода, мин	Число измерительных периодов	Число измерительных циклов
SM1	Измерение солнечного ветра	2	10	15
SM2	То же	2	10	15
SM3	То же	2	10	15
MM1	Измерение вблизи Марса	1	—	7
MM2	То же	2	10	15

симальная интенсивность регистрируемого сигнала). Определение номера этой энергетической ступени $(E/q)_{\max}$ осуществляется за время τ в конце так называемого "протонного" измерительного цикла $T = 8$ с. Последующий цикл измерений α -частиц проводится только при 8 значениях E/q , номера ступеней выбираются относительно ранее определенного $(E/q)_{\max}$ следующим образом: от $(E/q)_{\max} - 3$ до $(E/q)_{\max} + 4$ (время τ в конце цикла измерений α -частиц не используется). Скорость изменения E/q уменьшается при этом в 4 раза ($8 E/q$ ступеней за 8 с, см. табл. 2).

С выходов пересчетных устройств ПУ, регистрирующих выходные сигналы КЭУ, в блок БЭ-А поступают так называемые "слова данных" (по 16 бит). Каждое такое слово соответствует выходной информации одного КЭУ для одного значения азимутального угла β_i . Соответственно в цикле измерений протонов с выхода каждого КЭУ поступает $32 \times 8 = 256$ слов, а в цикле измерений α -частиц — $8 \times 8 = 64$ слова.

Блоки измерительных данных, соответствующие "измерениям протонов" и "измерениям α -частиц", представляют собой трехмерные $(3 - D)$ матрицы $8 \times 8 \times 8$ ($8E/q, 8AZ, 8EL$) 8-битовых слов, полученных из 16-битовых слов (на выходе ПУ) путем квазилогарифмического сжатия: 4 бита — мантисса и 4 бита — характеристика (основание 2). Однако каждый блок данных из 512 8-битовых слов обрезается по краям до 312 слов. При измерениях α -частиц блок данных определяется автоматически, а при измерениях протонов он образуется в зависимости от E/q таким образом,

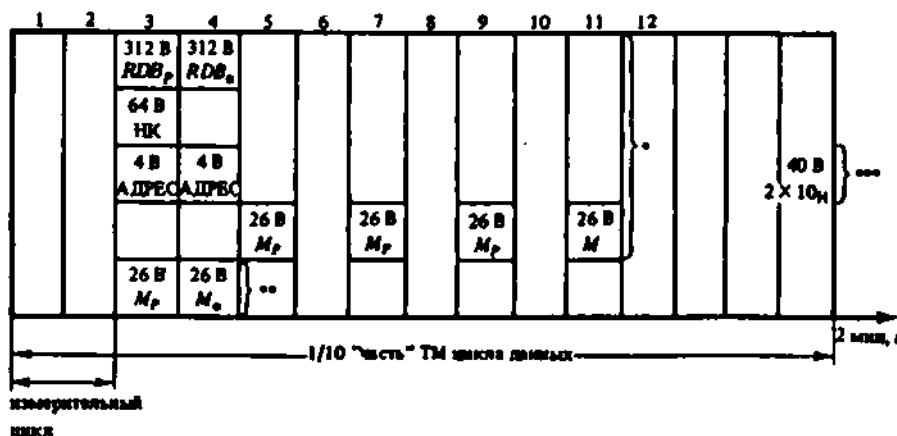


Рис. 3. Структура ТМ данных в режиме SM1

P – протоны, α – α -частицы, H – тяжелые ионы, RDB – 3-мерный блок данных, $НК$ – служебные данные, M – моменты (0 до 3), M_p – для протонов, M_α – для α -частиц, $R \times 1D_{1,4}$ – для одномерных спектров тяжелых ионов, \bullet – только в цикле 1, $\bullet\bullet$ – в циклах с 1 по 10, $\bullet\bullet\bullet$ – только в циклах 2, 4, 6, 8, 10, B – байт (8 бит)

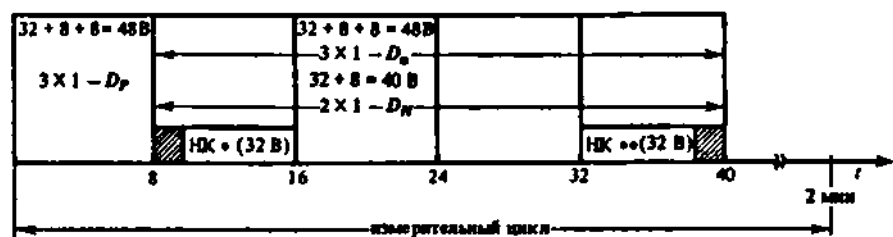


Рис. 4. Структура ТМ данных в режиме SM2

$1-D$ – одномерный спектр (P – протоны, α – частицы, H – тяжелых ионов), $3-D$ – трехмерный спектр (P , α или H), $2-D$ – двумерный спектр, \bullet – служебные данные ($НК$) передаются для наименьшего канала E/q , $\bullet\bullet$ – служебные данные передаются для наибольшего канала E/q

чтобы канал с максимальной скоростью счета соответствовал четвертому каналу E/q блока данных.

Логика работы прибора предусматривает 5 различных функциональных режимов работы и 2 калибровочных.

Каждый функциональный режим содержит различное сочетание измерительных 8 с-циклов, сформированных, в свою очередь, в периоды измерений. В табл. 2 приведен перечень имеющихся функциональных режимов и их временные характеристики.

Режим SM1. В режиме SM1 за 2-минутный период измерений сканируется 15 циклов. Структура данных для каждого 2-минутного цикла, в котором измерения протонов и α -частиц чередуются, представлена на рис. 3.

Данные измерений первого измерительного цикла (2 временных периода по 8 с) не передаются, а используются для определения номера канала E/q с максимальной скоростью счета. Блока данных второго цикла ($312 \times 2 =$

= 624 Б) передаются на Землю (для протонов и α -частиц). Служебные данные при регистрации протонов передаются 72 Б.

Пять пар одномерных спектров тяжелых ионов также передаются 8-битовыми сжатыми словами: $(32 + 8) \times 5 = 200$ Б. Остальные биты информации используются для передачи значений моментов функций распределений — 24 цикла (10 циклов для α -частиц и 4 для протонов) — для изучения быстрых флуктуаций.

Информативность, включая служебные данные, за 20 мин работы (10 измерительных периодов) — 1520 Б. Распределение ТМ информации для десяти измерительных периодов общей длительностью 20 мин приведено в табл. 2.

Режим SM2. В отличие от режима SM1 полный измерительный период SM2 состоит из 15 8-секундных временных циклов, его длительность составляет 2 мин. Первый цикл соответствует измерению протонов, и изменение анализирующего напряжения соответствует всем $32/q$ каналам (как и для протонов в режиме SM1), а во время следующих 4 циклов регистрируются спектры α -частиц (8 энергетических каналов E/q повторяются последовательно 4 раза, $4 \times 8 E/q = 32$ с уменьшенной в 4 раза скоростью сканирования) аналогично измерению α -частиц в режиме SM1. Такая последовательность повторяется три раза: $[(1E + 4\alpha) \times 3]$.

При измерениях в режиме SM2 не определяются ни максимум спектра, ни моменты функций распределений. Информация, по существу, представляет собой суперпозицию одномерных распределений протонов в зависимости от E/q , α и β (за время 8 с) и соответственно распределений частиц (за 32 с), что составляет суммарно $2 \times (32 + 8 + 8) = 96$ Б. Во время измерений α -частиц регистрируются два одномерных спектра тяжелых ионов (в зависимости от E/q , α и β), что составляет $32 + 8 = 40$ Б. Десять таких измерений равномерно распределяются во временном интервале 20 мин (рис. 4), включая служебные данные, информативность составляет 1424 Б.

Режим SM3. Измерения в режиме SM3 представляют собой чередование последовательностей измерительных циклов SM1/SM2 (SM3a), или SM1/MM2 (SM3b), или SM2/MM2 (SM3c).

Режим MM1. Измерения солнечного ветра в "быстром" режиме на трассе соответствуют припланетному режиму MM1 (рис. 5). В этом режиме прибор работает вблизи планеты Марс, длительность периода измерений составляет 1 мин. В этот период предполагается регистрировать одномерные и двумерные спектры, состоящие из (32×8) слов (сжатых квазилогарифмически). Вблизи планеты информативность равняется 12 блокам по 960 бит (1440 Б).

В марсианском режиме, кроме одномерных спектров, описанных выше, используются и двумерные: спектры $E/q - AZ$ или $E/q - EL$. В обоих случаях они состоят из 32×8 слов (Б), сжатых квазилогарифмически.

Каждый период измерения содержит 7 временных циклов + 4 с "мертвого" времени, так что длительность этого периода составляет 1 мин. Во время первых трех циклов прибор работает в режиме так называемых "высоких энергий", когда номинальные значения E/q идентичны таковым при измерениях солнечного ветра в режиме "трасса": от 150 до 6000 эВ. Последние четыре цикла прибор работает в режиме "низких энергий", при кото-

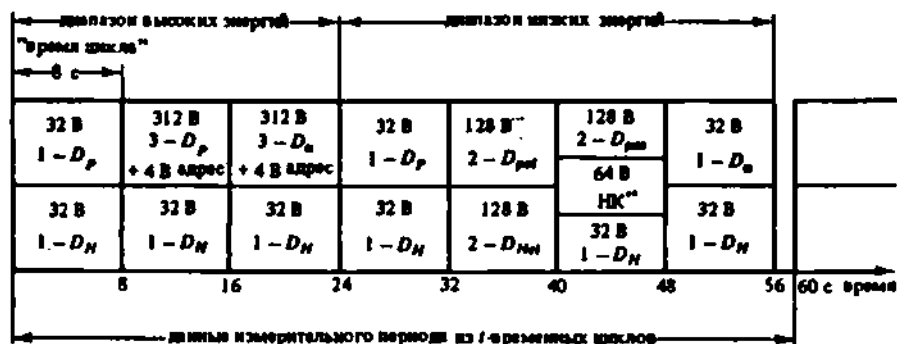


Рис. 5. Структура ТМ данных в режиме ММ1

$2D_{p\alpha}$ — двумерный спектр протонов (или тяжелых ионов, HeI) в зависимости от угла α

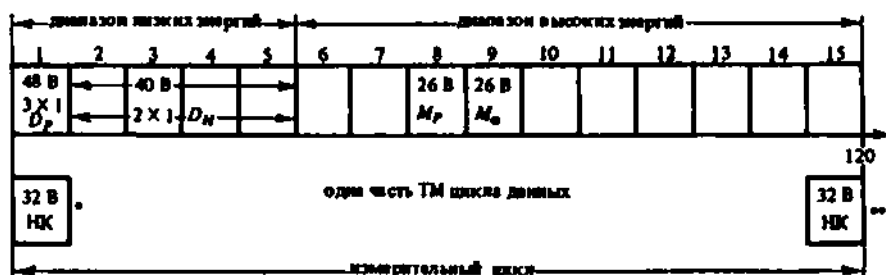


Рис. 6. Структура ТМ данных в режиме ММ2

$3 \times 1D_p$ — три одномерных спектра протонов, $2 \times 1D_H$ — два одномерных спектра тяжелых ионов

ром энергетический диапазон сдвигается в сторону меньших энергий и измерения начинаются с 30 эВ (см. рис. 5).

Структуру вывода информации в режиме ММ1 можно проследить из рис. 5. В режиме ММ1 информация передается в виде полных протонных и α -распределений (которые не всегда могут быть перекрыты полем зрения приборов). Основная задача измерений — обеспечить высокое временное разрешение как для тяжелых ионов (8 с для одномерного (1-Д) спектра и 60 с — для двумерного (2-Д) спектра), так и для протонов (максимум — 16 с), для спектров α -частиц разрешение ≈ 30 с.

Следует отметить две особенности:

два временных цикла блока данных, 1 и 2, определяются так же, как и в режиме SM1, но скорость сканирования при измерениях α -частиц (временной цикл 3) в 4 раза выше, чем в SM1,

блоки в 128 Б двумерных (2-Д) данных временных циклов 5 и 6 всегда представляют собой результаты двух соседних (четного и нечетного) угловых каналов при одном значении E/q (угловое разрешение уменьшено вдвое, чтобы сократить объем передаваемых данных).

Режим MM2. Полный измерительный период в марсианском режиме MM2 состоит из 15 циклов и составляет 2 мин. Во время первых 5 циклов используется режим "низких" энергий, а в остальных — "высоких" с чередованием сорта измеряемых частиц (протонов и α -частиц, как в режиме M1) (рис. 6). Период передачи данных остается равным 20 мин. Измерительный период начинается с пятиразовых временных циклов (8 с каждый) в "низком" энергетическом диапазоне. В первом временном цикле сканируется полный энергетический спектр — $32 E/q$ (с такой же скоростью, как протоны солнечного ветра) и регистрируются три одномерных (1-Д) спектра протонов (см. SM2). Информативность в этом случае $32 + 8 + 8 = 48$ Б. В течение следующих четырех временных циклов полные энергетические спектры измеряются с такой же скоростью как α -частицы в режиме солнечного ветра, и регистрируются два одномерных 1-Д спектра тяжелых ионов: результирующая информативность $32 + 8 = 40$ Б. Остальные 10 измерительных циклов соответствуют режиму SM1 (измерения протонов и α -частиц чередуются), а передаются только моменты для протонов и α -частиц ($2 \times 26 = 52$ Б). Для определения моментов используются 8-й и 9-й измерительные циклы соответственно. Такой измерительный период (по 15 циклов) повторяется 10 раз. Служебные данные передаются для первого (наинизшего) канала E/q в первом измерительном цикле и последнего (наивысшего) E/q канала в последнем цикле ($2 \times 32 = 64$ Б). Полный объем передаваемой информации — 1464 Б (см. рис. 6).

Режим калибровки 1 (TM1). Режим TM1 используется при наземных испытаниях. Он определяется командами и может соответствовать как измерениям в режиме "трасса" (солнечный ветер), так и в припланетном режиме. После окончания основного измерительного цикла блок БЭ-А переводит по команде прибор в режим измерений α -частиц и ступеньки E/q распределяются в четырех временных циклах: от 0 до 7 — в первом, от 3 до 15 — во втором, от 13 до 23 — в третьем и от 24 до 31 — в четвертом.

Вся служебная информация передается без сжатия в объеме 1024 Б. Выходные сигналы КЭУ при всех углах β_i и E/q каналах от 0 до 14 складываются, чтобы проверить отсутствие помех, т.е. "чистоту" нулевой скорости счета. Эти же измерения повторяются для каналов E/q от 17 до 31. Объем этих данных — 13 Б. Для 15-го канала E/q на счетчики КЭУ поступают сигналы с выхода калибровочного генератора фиксированных частот, чтобы проверить точность установления времени экспозиции и точность распределения информации в блоке данных. Эти данные передаются непосредственно (2 бит на измерение) и логарифмически сжимаются для проверки процедуры квазилогарифмического сжатия.

Калибровка может быть реализована как при быстром режиме TM-системы, так и при медленном в сочетании со всеми возможными рабочими состояниями прибора (вкл./выкл., высокое напряжение, различные уровни питания КЭУ и пр.). Последовательность проверок и их целенаправленность определяются командами.

Режим калибровки 2 (TM2). Режим калибровки 2 используется для проверки правильности функционирования калькулятора моментов и определения канала с максимальной скоростью счета. При этом на счетчик и КЭУ должны подаваться фиксированные частоты в соответствии с режи-

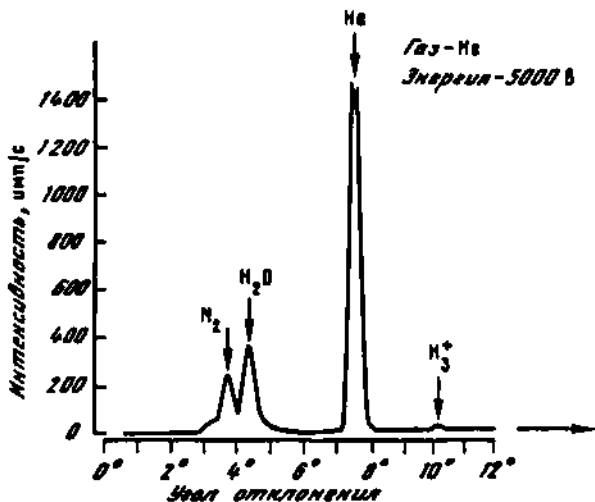


Рис. 7. Данные калибровки. Спектр масс ионов

мом SM1. Измерительный цикл и цикл передачи данных также соответствуют режиму SM1.

Данные о моментах функция распределений (нулевом, первом, втором и третьем), характеризующие плотность компоненты скорости, тензор давления и поток тепла, представляются и передаются 13 16-битовыми словами.

Служебные данные содержат и передают информацию о значениях углов β (от β_1 до β_8) при наименьшем и наибольшем номерах каналов E/q протонного измерительного цикла. Для этого используется 64 8-битовых слова (2 канала по 16 бит для передачи β_1, \dots, β_8 при $E/q_{\text{мин}}$ и $E/q_{\text{макс}}$, т.е. $(16 \times 2) \times 8 \times 2 = 64 \times 8$) (эти данные не сжимаются!).

В качестве примера на рис. 7 приведены результаты калибровки прибора, свидетельствующие о высокой разрешающей способности регистрации спектра масс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прибор ТАУС позволяет получать в полном объеме данные об ионах солнечного ветра и надежно разделять его основные компоненты протоны и α -частицы.

Измерения трехмерных энергоугловых распределений и обработка их посредством бортовой микро-ЭВМ дает информацию о плотности, скорости и температуре протонов и α -частиц солнечного ветра, а также о пространственно-временных вариациях этих параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schwenn R., Rosenbauer H. 10 Jahre Sonnenwind-Experiment and HELIOS 1 und 2, 10 years Helios, Publ., Celebrat. 10 anniver. of the launch of HELIOS on Dec. 10, 1974.
2. Rosenbauer H., Grünwaldt H., Livi S. et al. The mass-separating ion spectrometer on the AMPTE ion-release module 2 // Geosci. Remote Sens. 1985. Vol. 23, N 3. P. 280-281.

3. *March E., Mülhthäuser K.H., Schwenn R. et al. Solar wind protons: Three-dimensional velocity distributions and derived plasma parameters measured between 0,3 and 1 A, U // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 84. P. 52-72.*
4. *March E., Mülhthäuser K.H., Rosenbauer H. et al. Solar wind helium ions: observations of Helios Solar Probes between 0,3 and 1 A.U. 2 // Ibid. P. 35-51.*
5. *Wilken B. Identification techniques for nuclear particles on space plasma research and selected experimental results // Rep. Progr. Phys. 1984. Vol. 47. P. 767-853.*

УДК 523.62-726:520.662.07

*П. Курай¹, Н. Шютте², М. Веригин³, К. Грингауз²,
Т. Гомбоши¹, Т. Семерей¹, И.Т. Сюч¹, С. Шеронова²,
А. Надь³, Т. Кравенс³, У. Шарп³*

ЭКСПЕРИМЕНТ АЭГ-Ф-Д (комплекс ЭСТЕР)

ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ И НАПРАВЛЕНИЯМ В ПРОЕКТЕ "ФЛОБОС"

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Низкоэнергичные заряженные частицы играют значительную роль в энергетическом балансе ионосфер и магнитосфер планет, определяют динамику плазменных процессов в солнечном ветре и межпланетной среде [1].

Измерения последних лет продемонстрировали существенную роль низкоэнергичных электронов и ионов в процессах ионизации, передачи энергии, а также в процессах взаимодействия волна-частица, развивающихся в ионосферно-магнитосферных системах планет. Однако до сих пор имеется много нерешенных проблем: так, в полной мере не известны источники ионизации и энергизации ночных ионосфер планет, влияние низкоэнергичных частиц на астрономические процессы. Нет пока ясности и в интерпретации данных измерений в марсианской ионосфере. Например, для объяснения наблюдавшихся в экспериментах [2, 3] значений электронной плотности, по-видимому, необходимо привлечь дополнительный источник ионизации. Кроме того, практически отсутствуют экспериментальные данные о характере взаимодействия солнечного ветра с марсианской ионосферой, так же как экспериментальные сведения об ионном составе и температуре заряженных частиц вблизи планеты.

Для понимания процессов притока и диссипации плазмы, ее энергизации и термализации чрезвычайно важно иметь полную информацию о функции распределения заряженных частиц по энергиям, так как механизмы энергообмена, взаимодействий волн с плазмой проявляются в тех или иных отклонениях функции распределения от максвелловской. Данные об анизотропии функции распределения в зависимости от энергии могут свидетельствовать о природе зарегистрированных частиц.

¹ ЦИФИ ВАН.

² ИКИ АН СССР.

³ Мичиганский университет, США.