

СОВЕТ "ИНТЕРКОСМОС" ПРИ АН СССР
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ АН СССР
ОДЕССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МВ и ССО УССР

НАУЧНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ВЫПУСК 4

Приборы для исследования плазмы
и электромагнитных полей



МОСКВА
"МЕТАЛЛУРГИЯ"
1985

второй промежуточной частоты для фазовых детекторов, тактовые частоты для ГКП БОС и блок управления и синхронизации (БУС). Последний обеспечивает работу аппаратуры по заданной программе в течение одного цикла измерения.

Описанная принципиальная схема предлагаемого ионозонда пригодна для зондирования как ионосфер Марса и Венеры, так и плазмосферы Земли со спутника. Очевидно, в настоящее время имеется настоятельная необходимость в исследовании и верхних границ плазменных оболочек планет для более глубокого понимания характера взаимодействия солнечного ветра с планетами, роли собственного магнитного поля в процессе взаимодействия околопланетной плазмы с солнечным ветром, также различных плазменных явлений в магнитосфере Земли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Franklin C.A., Maclean M.A. — Proceed IEEE, 57, N 6, 1969, p. 52.
2. Breus T.K. — Geophysica Internationale, 19, N 1, 1980, p. 17.
3. Ondon T., Nakamura Y. et al. — J. Radio Res. Lab. 24, N 114, 1977, p. 67.
4. Грингауз К.И., Безруких В.В. — Геомагнетизм и аэрономия, т. 17, № 5, 1977, с. 18.
5. Breus T.K. Space Sci. Rev., 23, 1979, p. 253.
6. Васильев Г.В., Гончаров Л.П., Кушнеревский Ю.В. и др. — В кн.: Аппаратура для исследования внешней ионосферы. М.: изд. ИЗМИРАН СССР, 1980, с. 13.

УДК 523.78:629.78

*К.И. Грингауз, Г.А. Скуридин, А.П. Ремизов, Г.И. Волков,
Г.А. Владимирова, Л.И. Денщикова, И.Н. Клименко,
Т. Гомбоши, И. Апати, И. Сэмэрэи,
Р. Редл, Ш. Сэндро, А. Шомоди*

ПЛАЗМЕННАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С АТМОСФЕРОЙ КОМЕТЫ ГАЛЛЕЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ КОМЕТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

В число научных приборов, устанавливаемых на космическом аппарате (КА) "Венера-Галлей", предназначенном для исследования кометы Галлея во время его приближения к Солнцу в 1986 г. [1], включена также плазменная аппаратура "ПЛАЗМАГ-1". Основное назначение этой аппаратуры — изучение взаимодействия плазмы солнечного ветра с ионосферой кометы и изучение свойств околокометной плазмы. Помимо этого, аппаратура рассчитана на измерение параметров потоков ионов и электронов солнечного ветра на трассе КА Земля-Венера-комета.

Основными научными задачами эксперимента "ПЛАЗМАГ-1" во время полета КА "Венера-Галлей" являются:

регистрация и определение энергий ионов кометного происхождения, захваченных межпланетным магнитным полем, и изучение торможения солнечного ветра при его "нагрузении" этими ионами (50 эВ—25 кэВ); определение положения и структуры характерных границ околокометных плазменных образований (ударной волны, магнитного барьера, ионопаузы);

исследование ионного (массового) состава кометной ионосферы после пересечения ионопаузы, изучение неоднородностей потоков кометной плазмы (1—100 а.е.);

измерение энергетических спектров электронов и их вклада в ионизацию кометной атмосферы (3 эВ—5 кэВ);

изучение энергетических характеристик и концентрации ионной и электронной компоненты плазмы солнечного ветра до и после пересечения КА околокометной ударной волны.

Для решения указанных задач разрабатываемая аппаратура "Плазмаг-1" включает пять плазменных датчиков:

два ионных энергоспектрометра, один из которых ориентирован по вектору скорости КА относительно кометы $\vec{v}_{КА}$ и, таким образом, работает как напорный масс-спектрометр кометных ионов (так как $\vec{v}_T \ll \vec{v}_{КА}$, где \vec{v}_T — тепловая скорость ионов), а другой — в направлении на Солнце и предназначен для регистрации и определения энергетических характеристик ионов солнечного ветра до и после прохождения КА околокометной ударной волны;

один электронный спектрометр, ориентированный перпендикулярно направлению на Солнце и вектору $\vec{v}_{КА}$;

две интегральные ионные ловушки ориентированы точно так же, как и соответствующие ионные спектрометры.

Вся аппаратура "ПЛАЗМАГ-1" состоит из трех блоков: блока ЭСП-Г, включающего ионные и электронный энергоспектрометры и всю электронную часть аппаратуры; ионной ловушки ПЛ-40С (ориентированной на Солнце) и ионной ловушки ПЛ-40Г (ориентированной по вектору $\vec{v}_{КА}$). Суммарная масса 5,5 кг, суммарное максимальное энергопотребление 8 Вт.

Устройство спектрометров. Электронный энергоспектрометр разрабатывается в расчете на работу как в солнечном ветре, так и в ионосфере кометы при ближайшем к ядру проходе КА. Поскольку, согласно современным представлениям [2], концентрация кометной ионосферы может составить $\sim 10^4 - 10^5 \text{ см}^{-3}$, то в приборе предусмотрен большой динамический диапазон по потоку электронов, обеспечивающий проведение измерений в диапазоне $5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^{11} \text{ част}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{sr})$ и в диапазоне энергий от 3 до 5000 эВ.

Электронный анализатор состоит из 120-градусной цилиндрической отклоняющей системы, на которую в самом быстром режиме каждую секунду подается серия из 30 анализирующих потенциалов, распределенных по экспоненциальному закону. Входная площадь анализатора составляет $0,1 \text{ см}^2$, средний радиус кривизны 45 мм, коэффициент выигрыша по энергии $E/eU = 1/2 \ln(R_2/R_1) = 10$ (R_1 и R_2 — радиусы внут-

ренной и внешней отклоняющих пластин). При таких параметрах угловое и энергетическое разрешение по проведенным расчетам составляет соответственно $\pm 3,5^\circ$ и $\pm 7\%$, а энергетический фактор $2 \cdot 10^{-5} \cdot E_0 \text{ см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{кэВ}$.

Вход анализатора ориентирован под углом 90° относительно направления на Солнце и по вектору относительной скорости $\vec{v}_{\text{КА}}$. Это предотвращает от попадания на спектрометр как солнечного УФ-излучения, так и пылевых и нейтральных частиц от кометы.

В качестве детектора используется два вторичных электронных умножителя канального типа. Для определения степени деградации каналотронов введено специальное калибровочное устройство, включающее источник электронов (радиоактивный тритиловый изотоп с периодом полураспада 9 лет, излучающий электроны в диапазоне до ~ 15 кэВ с максимумом распределения в районе ~ 8 кэВ). Калибровка каналотронов осуществляется периодически один раз в сутки по внешним сигналам.

Ионные энергоспектрометры. Для измерений ионной компоненты плазмы используются два идентичных, работающих одновременно спектрометра, ориентированных один по вектору относительной скорости $\vec{v}_{\text{КА}}$, а другой в направлении на Солнце. Условия проведения эксперимента, а именно высокая скорость измерения, ограничения по массе и информативности, вынуждают отказаться от трехмерной функции распределения ионов по энергии и ограничиться энергетическим распределением. Высокая относительная скорость КА (78 км/с) по сравнению с тепловой скоростью ионов кометного происхождения позволяет использовать ионный спектрометр, ориентированный по вектору $\vec{v}_{\text{КА}}$ как напорный масс-спектрометр. Поэтому для определения массового состава кометной ионосферы в диапазоне масс от 1 до 100 а.е. был выбран соответствующий диапазон по энергии от 15 до 3500 эВ (энергия водорода со скоростью $v_{\text{КА}} \sim 32$ эВ). Согласно модели [3], в окрестности кометы можно ожидать следующие ионы: C^+ , Ca^+ , CO^+ , CH^+ , OH^+ , CN^+ , N_2^+ , CO_2^+ , H_2O^+ . Причем, концентрация их может составлять несколько сотен тысяч частиц в см^{-3} . В то же время важно регистрировать ионизированные нейтральные частицы далеко за пределом ударной волны в солнечном ветре, где их концентрация мала. Поэтому был выбран динамический диапазон для спектрометра кометных ионов от 10^{-3} до $10^+ 5 \text{ см}^{-3}$.

Точность ориентации КА и абберационные эффекты вынуждают иметь широкую угловую апертуру для спектрометра как солнечного ветра, так и холодной кометной плазмы.

Для обеспечения высокой чувствительности спектрометра и защиты его детектора от пылевых и нейтральных частиц и от УФ-излучения использованы электростатические анализаторы с искривленной геометрией траекторий заряженных частиц. Высокое разрешение $\Delta E/E$ неизбежно приводит к малой угловой апертуре. Получить одновременно широкую угловую диаграмму направленности и высокое разрешение по энергии можно, используя сочетание электростатического анализатора и электростатической линзы на входе, работающей в режиме расширения угловой апертуры.

Каждый спектрометр представляет собой полусферический электростатический анализатор, на входе которого установлена квадрупольная электростатическая линза. Средний радиус кривизны электродов анализатора $R_{\text{ср}} = 45$ мм, зазор между ними $\Delta l = 2,5$ мм. Параметры анализатора и электростатической линзы подобраны так, чтобы их коэффициенты по энергии E совпадали и были равны ≈ 7 . Сочетание сферического анализатора и квадрупольной линзы позволяют получать угловую апертуру для спектрометра солнечного ветра $\sim \pm 25^\circ$ и для спектрометра холодной плазмы $\sim \pm 15^\circ$. Работа электростатической квадрупольной линзы в сочетании со сферическим анализатором подробно представлена в [4].

Энергетический анализ потоков связи осуществляется путем подачи на внешний электрод анализатора серии положительных напряжений. В самом быстром режиме на солнечный спектрометр подается 60 уровней напряжений в диапазоне 7–3500 В в течение 1 с, а на спектрометр холодной плазмы 120 уровней, перекрывающих без зазора весь диапазон измерений по энергии от 15 до 3500 эВ. Таким образом, гарантируется измерение любой массы в диапазоне от 1 до 100 а.е.м. Для солнечного спектрометра 60 уровней распределяются по энергетическому диапазону 50–25 000 эВ примерно равномерно в логарифмическом масштабе. Однако большое количество уровней сосредоточено в диапазоне до ~ 5 кэВ, где в основном находится ядро функции распределения ионов солнечного ветра.

В качестве детектора ионов в обоих спектрометрах используются вторичные электронные умножители канального типа. Для определения степени деградации каналотронов используются калибровочные устройства на основе изотопного источника электронов (такого же, как и в электронном спектрометре). Режим калибровки аналогичен режиму калибровки электронного спектрометра.

Поскольку высоких потоков ионов на спектрометр, ориентированный на Солнце, не ожидается, в нем не предусмотрено мер для расширения динамического диапазона измерений (он составляет $5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^9$ част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1}$). Для спектрометра холодных ионов на выходе анализатора предусмотрено устройство для снижения чувствительности на 3 порядка. Таким образом, полный динамический диапазон составляет 10^8 . Режим с пониженной чувствительностью включается периодически на полный спектр (1 с), каждый 4-й спектр.

Ионные ловушки. Основное назначение интегральных ионных ловушек — измерение полного потока ионов солнечного ветра и кометного происхождения и их вариаций. Ионная ловушка состоит из входного коллиматора, ограничивающего кривую апертуру солнечной ловушки до $\pm 30^\circ$, ловушки для тепловых ионов до $\pm 20^\circ$, коллектора и ряда сеток. Ближайшая к коллектору супрессорная сетка с отрицательным (-70 В) потенциалом в основном режиме предназначена для снижения срока за счет ультрафиолетового излучения Солнца и за счет вторичных эффектов от попадания на нее ионов и (для тепловой ловушки) нейтральных частиц. Запирающая сетка с потенциалом $+5/+3500$ В предназначена для

определения срока, создаваемого токами с супрессорной сетки. В основном режиме (+5 В) коллекторный ток состоит из фоновой составляющей и полезного сигнала (ионов).

При подаче +3500 В на запирающую сетку практически все ионы не доходят до коллектора и коллекторный ток определяется только фоновой составляющей. Другая супрессорная сетка перед запирающей с потенциалом -60 В предназначена для предотвращения попадания электронов тепловой плазмы на запирающую сетку (чтобы не нагружать высоковольтный источник в плотных слоях ионосферы кометы).

Электроника. Центральным узлом прибора является блок управления. Он представляет собой микро-ЭВМ, включающую микропроцессор типа COP-1802, оперативную память, память программ, память данных и интерфейсы микропроцессора типа COP-1802.

Блок управления координирует работу прибора, обеспечивает сбор данных с ловушек и энергоспектрометров, сортирует их в определенном порядке и выдает данные в ТМ-систему в удобном для обработки виде. Блок управления работает по программе, которая хранится в памяти программ. В последней также хранятся циклограмма работы прибора, закон изменения высоковольтных напряжений и сами номиналы высоковольтных напряжений. Это обеспечивает возможность после калибровки датчиков на вакуумной установке заложить необходимые номиналы высоковольтных напряжений программным путем, не изменяя элементов схемы. Таким же образом можно в разумных пределах изменить циклограмму работы прибора (время экспозиции прибора в одном энергетическом интервале, количество энергетических интервалов высоковольтных напряжений и т.д.), т.е. микропроцессорный блок обеспечивает большую мобильность системы, позволяет оптимизировать ее работу с учетом особенностей датчиков после проведения экспериментальных и калибровочных работ с аппаратурой.

Блок управления принимает через интерфейс и обрабатывает внешние команды и кодовые послышки, что дает возможность изменить режим работы прибора в соответствии с различными вариантами циклограммы работы прибора в полете.

Данные с информационных трактов в соответствии с программой записываются в память данных и хранятся в ней до передачи в ТМ-систему. Микро-ЭВМ имеет оперативную память, которая является рабочей памятью микропроцессора и позволяет хранить промежуточные результаты операций над данными.

Сигналы с выходов каналотронов поступают на зарядочувствительный усилитель, а затем на дискриминатор. Зарядочувствительный усилитель выполнен в виде гибридной схемы СЕМ (институт Макса Планка, ФРГ) и обладает высокими технико-эксплуатационными характеристиками ($8 \cdot 10^{-14} - 8 \cdot 10^{-11} \text{ К}$, $f = 10^6 \text{ Гц}$). После дискриминатора нормализованные сигналы поступают на 16-разрядные счетчики типа С04020. Данные со счетчиков подаются в микропроцессор, где число сосчитанных импульсов преобразуется в виде мантиссы и характеристики логарифма.

Мантисса и характеристика записываются в память данных 8-разрядным словом (4 разряда — мантисса, 4 — характеристика).

Регистрация токов ловушек осуществляется по следующей схеме. Сигналы с коллекторов ловушек поступают на вход предусилителя, который в зависимости от величины измеряемого тока изменяет диапазон чувствительности. Затем усиленный сигнал подается на вход логарифмического преобразователя, который позволяет существенно расширить динамический диапазон измеряемых токов. Через эмиттерный повторитель сигнал подается на вход мультиметра, а затем на аналого-цифровой преобразователь. Сигнал в цифровом виде поступает на вход микропроцессора, а затем в память данных. Каждое значение измеряемого тока хранится в памяти данных в виде одного 9-разрядного слова (включая знак тока).

Режим работы. Во время работы КА прибор работает в трех режимах: "Трасса-I", "Трасса-II" и РЛ-65.

В режиме "Трасса-I" работают два энергоспектрометра: энергоспектрометр ионов солнечного ветра и энергоспектрометр электронов (по два спектра в течение 20 с через каждые 20 мин). Информативность прибора 1512 бит/20 мин. В режиме "Трасса-I" прибор включается один раз в 20 мин по приходу 20-временной метки. В течение 20 с прибор накапливает информацию в памяти данных. Вывод информации из прибора осуществляется цифровым массивом 168 бит по однопроводной схеме и сопровождается синхрос частотой 3072 Гц.

В режиме "Трасса-II" работают все спектрометры; информативность прибора 14112 бит/20 мин. Аппаратура работает непрерывно, порядок вывода информации такой же, как и в режиме "Трасса-I".

В режиме РЛ-65 работают все спектрометры; информативность прибора 1960 бит/с. В прибор каждую секунду поступает сигнал запроса о выводе информации, одновременно в прибор поступает синхрос частота 65536 Гц. Вывод информации из прибора осуществляется цифровым массивом 960 бит по однопроводной схеме.

Прибор также располагает возможностью одновременной работы на телеметрию 65536 и 3072 Гц.

Обеспечение высокой надежности аппаратуры. Уникальность планируемого проекта и его высокая стоимость заставляют обращать особое внимание на повышение надежности аппаратуры. С этой целью в прибор "ПЛАЗМАГ-2" принят ряд технических решений. В частности, для обеспечения долговременной работы каналотронов (ВЭУ) используется их дублирование во всех спектрометрах. Причем по трассе регулярно раз в сутки чувствительность всех каналотронов контролируется с помощью стабильных потоков электронов.

Для предотвращения попадания на ВЭУ агрессивных компонент (во время маневров КА) в приборе предусмотрены крышки, закрывающие доступ газам на время работы маневровочных и стартового двигателей КА.

На все спектрометры и ионные ловушки подается высоковольтное напряжение от разных источников, что обеспечивает их независимую

работу. Поэтому выход из строя одного из этих источников не влияет на работу других спектрометров. Для обеспечения надежной работы в приборе применено дублирование всех входных и выходных цепей, связанных с внешними системами объекта, дублирование микро-ЭВМ, а также используется тирингирование информационной части числовой команды.

Основные параметры аппаратуры приведены в таблице.

Датчики	Параметры					
	входная площадь, см ²	угловая апертура, град.	энергетический диапазон, эВ	динамический диапазон, (част/см ² ·с.ср)	диапазон и разрешение по массе (M/M)	разрешение по энергии, (E/E), %
Ионная ловушка (ориентирована в направлении на Солнце)	5	60x60	—	10 ⁴ —10 ¹⁰	—	—
Ионная ловушка (ориентирована по вектору скорости КА относительно кометы)	5	40x40	—	10 ⁴ —10 ¹²	—	—
Энергоспектрометр ионов (ориентирован по вектору скорости КА относительно кометы)	0,1	±15	15—3500	10 ⁻³ —10 ⁻⁵	1—100 20—25	4—5
Энергоспектрометр ионов (ориентирован						

Продолжение табл.

Датчики	Параметры					
	входная площадь, см ²	угловая апертура, град.	энергетический диапазон, эВ	динамический диапазон, (част/см ² ·с.ср)	диапазон и разрешение по массе (M/M)	разрешение по энергии, (E/E), %
в направлении на Солнце	0,1	±25	50—25000	5·10 ⁴ —5·10 ⁹	—	5
Энергоспектрометр электронов (ориентирован перпендикулярно направлению на Солнце и вектору (КА)	0,1	±3,5	3—5000	5·10 ⁴ —5·10 ¹¹	—	7

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Sagdeev R.Z., Skuridin G.A., Galeev A.A.* et al. — Preprint IAF-81-200, Rome, Italy, September 6—12, 1981, p. 24.
2. *Huebner W.P., Gignere P.T.* — A model of comet coma. 2. Effects of solar photodissociation ionization, *Astrophys. J.*, 753, 1980, p. 238.
3. *Mendis D.A., Houpsis H.L.* — Preprint University of California, San Diego, La Jolla, December, 1981, p. 34.
4. *Ремизов А.П., Клименко И.Н., Волков Г.И.* и др. — В кн.: Международный семинар по космическому приборостроению (Одесса, 1982 г.): Тез. докл. М.: Изд. ИКИ АН СССР, с. 29.