

УДК 523

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСА ПЛАЗМЕННЫХ ПРИБОРОВ В ПРОЕКТЕ *ВЕНЕРА-Д*

© 2024 г. Д. А. Моисеенко*, О. Л. Вайсберг, А. И. Петух, Р. Н. Журавлев

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

**e-mail: modaldi@cosmos.ru*

Поступила в редакцию 26.02.2024 г.

После доработки 21.03.2024 г.

Принята к публикации 28.03.2024 г.

В статье рассматривается перечень актуальных научных задач, которые позволит решить плазменный комплекс приборов на борту космического аппарата *Венера-Д*, а также описывается структура и принцип функционирования трех плазменных приборов: ионного энерго-масс анализатора, электронного энерго-анализатора и детектора энергичных нейтральных атомов.

DOI: 10.31857/S0023420624060098, EDN: IFIEVS

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на довольно продолжительный период исследования Венеры космическими аппаратами, ее плазменное окружение остается объектом повышенного интереса, тем более, что в настоящий момент на орбите планеты нет спутников, способных проводить качественные измерения космической плазмы. Наличие современного комплекса плазменных приборов на борту перспективного космического аппарата (КА) *Венера-Д* позволит получить новую научную информацию и детально исследовать процессы, происходящие при взаимодействии солнечного ветра с атмосферой Венеры. Измерения плазмы и магнитного поля, выполненные на космических аппаратах *Венера-9* и *Венера-10* в 1970-х гг. прошлого века, позволили получить начальные данные о процессах взаимодействия солнечного ветра и формирования индуцированной магнитосферы. Значимый вклад в изучение взаимодействия солнечного ветра с атмосферой Венеры внесли результаты измерений в рамках космической миссии *Pioneer Venus Orbiter* (1978) [1]. Полученные экспериментальные данные позволили разработать модель индуцированной магнитосферы Венеры [2, 3]. Также проводились исследования процессов взаимодействия

солнечного ветра с Венерой в рамках миссии *Venus Express* (1978) [4, 5]. На сегодняшний день наиболее актуальными научными данными являются результаты работы плазменного комплекса, размещенного на КА *Venus Express*, запущенного в 2005 г. В течение данной миссии были выполнены уникальные измерения в полярных регионах и на терминаторных орбитах, а также получены данные о параметрах плазмы в хвосте Венеры [5]. Однако, несмотря на плодотворную работу данного космического аппарата, изучение плазменного окружения Венеры сохраняет свою актуальность.

2. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ПЛАЗМЕННЫХ ПРИБОРОВ

Поскольку Венера не имеет собственного магнитного поля, становится возможным прямое взаимодействие солнечного ветра с частицами верхних слоев атмосферы планеты. Таким образом, можно говорить о кометном характере взаимодействия верхних слоев атмосферы Венеры с солнечным ветром. Из-за такого характера взаимодействия поток частиц за Венерой нагружен планетарными ионами, захваченными потоком солнечного ветра и ионизованными в результате воздействия ультрафиолетового излучения

Солнца. Ионизация планетарных атомов приводит к развитию наведенной магнитосферы и головной ударной волны. Потери тяжелых ионов, вызванные воздействием солнечного ветра, вносят значительный вклад в процессы потери атмосферы Венеры.

Открытие каметоподобного характера взаимодействия плазмы с атмосферой Венеры и процессов, приводящих к потерям атмосферных ионов, позволило оценить, как эти потери зависят от солнечной активности и параметров межпланетной среды, а также определить возможность их значительного влияния на изменения химического состава атмосферы с течением времени.

Параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля могут меняться во времени на масштабах от единиц до десятков минут. Эти изменения напрямую влияют на параметры магнитосферы Венеры на различных ее участках и также приводят к изменению характеристик ионосферы. Изменчивость условий в магнитосфере и ионосфере приводит к изменениям параметров захвата и потерь тяжелых атмосферных ионов. Другую немаловажную роль в изменении характера взаимодействия солнечного ветра с атмосферой Венеры выполняют такие крупномасштабные события, как межпланетные ударные волны, корональные выбросы массы и области ко-ротационного взаимодействия между быстрыми и медленными потоками солнечного ветра.

Исследования характера взаимодействия космической плазмы с атмосферой Венеры позволили получить общие данные о явлениях, связанных с индуцированной магнитосферой, о процессах, приводящих к потерям атмосферы. Однако еще целый ряд научных задач может быть решен с помощью современных приборов плазменного комплекса при проведении измерений в солнечном ветре и магнитосфере вблизи Венеры. Для обеспечения полноты получаемой научной информации в состав плазменного комплекса должны входить: энерго-масс-спектрометр ионов, спектрометр электронов, датчик магнитного поля, прибор для мониторинга потока солнечного ветра, детектор нейтральных атомов.

Наличие на борту космического аппарата подобного комплекса приборов позволит решать следующие задачи:

- Определение соотношения скорости потерь между водородом и дейтерием.

- Определение содержания первичного азота в атмосфере Венеры, определение скорости потерь.

- Исследование изменения характера взаимодействия солнечного ветра с Венерой в зависимости от флуктуаций солнечного ветра и межпланетной плазмы, корональных выбросов.

- Исследование изменений характеристик индуцированной магнитосферы при возмущениях в солнечном ветре, корональных выбросах и изменениях в межпланетном магнитном поле.

- Определение суммарного убегающего потока планетарных ионов, определение состава этих ионов.

- Влияние солнечного ветра на характеристики ионосферы Венеры.

- Определение механизмов, оказывающих наибольшее влияние на потери атмосферы, определение характера взаимодействия этих процессов.

- Исследование роли волн в плазме, из влияния на процессы ускорения, нагрева и потери планетарных ионов.

- Определение влияния эффекта взаимодействия ионов и нейтральных атомов на параметры индуцированной магнитосферы

- Исследование механизмов пересоединения в хвосте индуцированной магнитосферы и определение их вклада в процессы потерь ионосферных ионов.

3. ИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР

Измерение функции распределения ионов по скоростям — одна из основных задач, позволяющих изучать процессы взаимодействия солнечного ветра с атмосферой Венеры и исследовать процессы, протекающие в индуцированной магнитосфере планеты и в ее хвосте. В рамках миссии *Венера-Д*, ионный энерго-масс-спектрометр АРИЕС-Л позволит определить массовый состав потока планетарных ионов, отследить его изменения в различных условиях и различных областях магнитосферы Венеры. Среди задач ионного спектрометра можно выделить следующие:

- Измерение функции распределения по скоростям уходящих ионов с целью исследования механизмов потерь и ускорения частиц.

- Исследование тонких структур на границах магнитосферы с помощью высокочастотных измерений параметров плазмы и магнитного

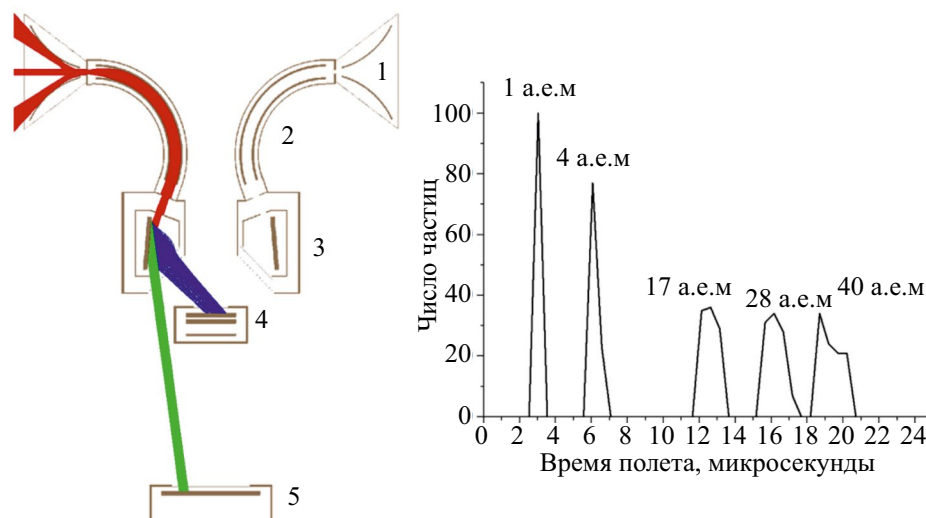


Рис. 1. Структура модуля электростатической оптики ионного спектрометра и результаты моделирования работы его времяпролетной схемы. 1 — сканирующее устройство, 2 — тороидальный электростатический анализатор, 3 — модуль мишени, 4 — электронный стартовый детектор, 5 — стоповый детектор.

поля. Такие исследования позволят получить информацию о происхождении этих границ.

- Исследование процессов массовой нагрузки на атмосферу Венеры, определение скорости потерь и влияния сильных возмущений солнечного ветра.

- Исследование процессов ускорения в токовых слоях.

Для качественного решения поставленных научных задач существенную роль играет не только высокое угловое и энергетическое разрешение, но и время, необходимое для проведения измерений в полном диапазоне энергий. Сокращение времени, затрачиваемого на получение полного спектра, можно достичь использованием электростатической оптики, обеспечивающей одномоментное поле зрения с широким телесным углом, как это реализовано в приборах АРИЕС-Л [6] или PICAM [7]. Лабораторные испытания и измерения, проведенные в условиях космического пространства, показали работоспособность и надежность предложенной схемы электростатической оптики, продемонстрировали достижимость высоких аналитических характеристик. Однако использование электростатического затвора для массового анализа регистрируемых частиц накладывает ряд ограничений на скорость функционирования прибора и снижает его чувствительность при работе в режиме регистрации массового спектра.

В связи с этим была разработана концепция нового широкоугольного ионного

спектрометра, обеспечивающего регистрацию энергетического и массового спектра ионов в диапазоне энергий от 10 до 10 000 эВ, в котором для определения массового состава регистрируемых ионов используется времяпролетная схема, построенная на эффектах взаимодействия заряженных частиц с мишенью-нейтрализатором. Прототипом данной системы служит времяпролетный модуль, реализованный в приборе ASAN [8]. Рассмотрим устройство и принцип функционирования разрабатываемого спектрометра более подробно.

Структура электростатической оптики спектрометра ионов и результат моделирования работы его времяпролетной схемы представлены на рис. 1. Она состоит из двух основных узлов: электростатического анализатора и времяпролетной системы. Оптика имеет цилиндрическую симметрию относительно вертикальной оси рисунка, что обеспечивает поле зрения по азимутальному углу 360° с разрешением не хуже 30° .

Узел электростатического анализатора обеспечивает выбор частиц по соотношению E/Q и представляет собой сочетание сканирующего устройства (1), обеспечивающего поля зрения прибора по полярному углу в диапазоне $\pm 60^\circ$ с разрешением не хуже 20° и тороидального электростатического анализатора (2), настроенного в текущей конфигурации модели на разрешение $\Delta E/E = 10\%$.

За осуществление анализа массового состава частиц M/Q , прошедших через

электростатический анализатор, отвечает времяпролетный модуль, состоящий из мишени-нейтрализатора (3) и двух детекторов — электронного (4), необходимого для формирования стартового импульса времяпролетной системы и ионного (5), на котором формируется стоповый импульс.

Принцип функционирования предложенной времяпролетной схемы следующий: ионы выбранной энергии после электростатического анализатора попадают в модуль мишени (3) и, ускоренные электрическим полем, ударяются о мишень, изготовленную из полированного вольфрама. В результате этого взаимодействия ионы захватывают электроны с поверхности мишени и отражаются в виде нейтральных атомов в сторону стопового детектора (5). Эффективность преобразования ионов в нейтральные атомы зависит от ряда факторов, но определяющими являются материал мишени, качество обработки поверхности и угол падения частиц на мишень [9]. Кроме того, в процессе взаимодействия ионов с поверхностью мишени рождаются вторичные частицы — низко энергичные ионы, выбитые из поверхности мишени и вторичные электроны с малой начальной энергией [10]. Вторичные ионы отражаются ускоряющим потенциалом и запираются в пределах модуля мишени (3), а вторичные электроны ускоряются и фокусируются на детекторе (4). Время регистрации электрона на детекторе (4) служит стартовым импульсом для запуска измерения времени пролета частиц. Стоповым импульсом служит регистрация нейтрального атома детектором (5). Согласно проведенному компьютерному моделированию, предложенная времяпролетная схема позволит получить массовое разрешение $M/dM = 20$.

Принцип работы предложенной времяпролетной схемы имеет очень много общего с времяпролетными модулями, построенными на принципах взаимодействия ионов с тонкой углеродной фольгой [11]; в случае необходимости узел (3) может быть реализован как на мишени-нейтрализаторе, так и на мишени на основе углеродной фольги. Основное преимущество предложенной схемы времяпролетного анализа заключается в том, что в отличие от электростатического затвора, она не снижает чувствительность прибора при работе в режиме регистрации массового спектра.

Разработанная концепция ионного спектрометра позволяет осуществлять регистрацию энергетического и массового состава частиц в

диапазоне энергий от 10 до 10 000 эВ с широким полем зрения ($360^\circ \times 120^\circ$), высоким энергетическим ($\Delta E/E = 10\%$) и массовым разрешением ($M/dM = 20\%$). Предложенная времяпролетная схема прибора позволяет регистрировать массовый состав частиц без снижения чувствительности прибора, как это происходит при применении времяпролетных схем, построенных на электростатическом затворе.

4. ЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР

Спектрометр электронов — важная составная часть плазменного комплекса и позволяет решать задачи, связанные с измерением параметров солнечного ветра вблизи Венеры, исследовать процессы, связанные с взаимодействием солнечного ветра и межпланетной плазмы с индуцированной магнитосферой, проводить измерения в обтекающем потоке и хвосте Венеры. Прибор предназначен для измерений функции распределения солнечного ветра, обтекающего потока, магнитосферы и ионосферы Венеры. Подобные измерения позволяют исследовать процессы взаимодействия частиц с магнитосферой планеты, определять механизмы ускорения частиц, исследовать тонкие структуры на границах магнитосферы.

Структура спектрометра состоит из двух модулей: электроники и электростатической оптики. Модуль электроники представляет собой электронные платы низковольтных и высоковольтных источников питания, модули памяти, процессорные модули, электронные платы интерфейсов обмена данными, аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи и детектор на микроканальных пластинах.

Модуль электростатической оптики включает в себя сканер и тороидальный электростатический анализатор. Структура электронно-оптической схемы прибора и результат проверки его разрешения по азимутальному углу приведены на рис. 2.

Система электродов углового сканера (1) обеспечивает поле зрения прибора 360° по азимутальному углу и 120° по полярному, за исключением незначительных затенений элементами конструкции модуля электронной оптики. Модуль электронной оптики имеет цилиндрическую симметрию. Принцип действия прибора следующий: заряженные частицы, проходя через угловой сканер (1), попадают во входную диафрагму-аттенюатор (2) и направляются на входное окно тороидального

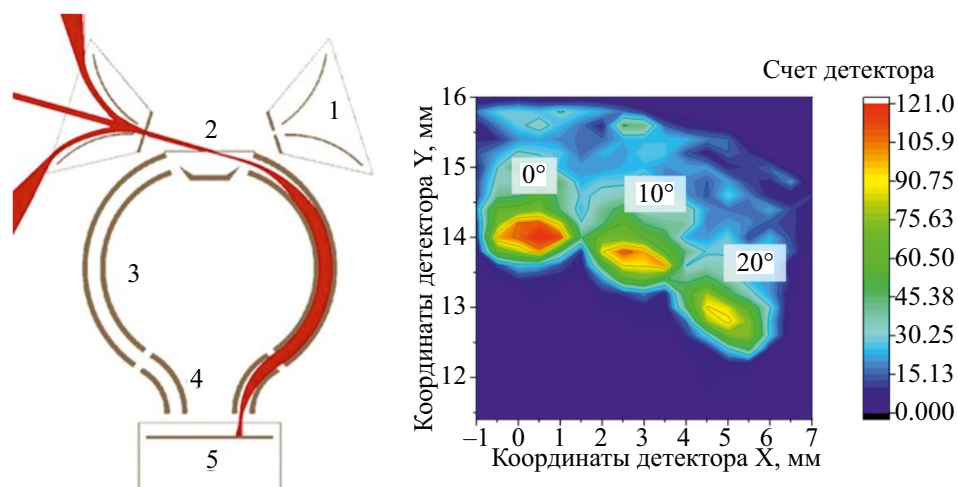


Рис. 2. Схема электростатической оптики спектрометра электронов ЭЛСПЕК и результаты проверки его углового разрешения по азимутальному углу: 1 — сканирующее устройство, 2 — центральная диафрагма, 3 — электростатический анализатор, 4 — корректирующий электрод, 5 — координатно-чувствительный детектор.

электростатического анализатора (3). Диафрагма-аттенюатор позволяет регулировать энергетическое разрешение прибора и при необходимости уменьшать геометрический фактор прибора. Угловой сканер (1) представляет собой систему из двух электродов эллиптической формы. Подача потенциала на обкладки этих электродов позволяет менять направление поля зрения прибора в диапазоне $\pm 60^\circ$ по полярному углу. Тороидальный электростатический анализатор (3) служит для выделения узкого энергетического диапазона энергии заряженных частиц. Его внешняя обкладка заземлена, а на внутреннюю обкладку подается потенциал, отклоняющий заряженные частицы. Частицы, энергия которых соответствует поданному потенциалу для заданной формы анализатора, проходят его и, миновав корректирующий электрод, попадают на координатно-чувствительный детектор. Корректирующий электрод (4) служит для обеспечения нормального угла падения на поверхность координатно-чувствительного детектора на основе микроканальных пластин (5). По координатам прихода частицы на детектор, можно определить азимутальный угол с которого пришла частица на вход прибора.

Схема электростатической оптики прибора позволяет регистрировать пространственную функцию распределения электронов в диапазоне энергий от 10 эВ до 10 кэВ с энергетическим разрешением $\Delta E/E = 10\%$ с полем зрения $360^\circ \times 120^\circ$ и угловым разрешением 20° по полярному углу и 15° по азимутальному.

5. МАСШТАБИРУЕМОСТЬ ПРЕДЛОЖЕННОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Использование современной электронно-компонентной базы позволяет в значительной степени миниатюризировать модули электроники, отвечающие за функционирование высоковольтных источников питания, детекторной части и плат управления, и при этом сохранить высокие показатели надежности разрабатываемых приборов. Совместно с широким использованием компьютерного моделирования при разработке модулей электростатической оптики это дает возможность создать концепцию компактных спектрометров ионов и электронов, отвечающих современным требованиям к плазменным приборам и при этом пригодных для размещения либо на борту малых космических аппаратов, либо в составе служебной аппаратуры на борту спутников.

Подобные спектрометры могут быть использованы как для мониторинга за состоянием магнитосферы и ионосферы в рамках актуальной тематики космической погоды, так и использоваться в качестве дополнительной полезной нагрузки на малых космических аппаратах при осуществлении межпланетных миссий. Так, использование субспутника, оснащенного ионным спектрометром в миссии *Венера-Д* может значительно повысить ценность научных данных, получаемых комплексом плазменных приборов, а оснащение луноходов компактными

спектрометрами плазмы и детекторами энергичных нейтральных атомов позволит исследовать процессы взаимодействия солнечного ветра с реголитом на различных участках лунной поверхности, а также процессы зарядки поверхности Луны под воздействием ультрафиолета и потоков космической плазмы [12].

Предложенная схема электростатической оптики прибора ЭЛСПЕК изначально рассчитывалась для координатно-чувствительного детектора с рабочим диаметром 50 мм. Однако проведенный анализ и последующее моделирование показало, что предлагаемая оптическая схема может быть масштабирована для детекторов с диаметром рабочей зоны ~25 мм без потери качества аналитических характеристик. При использовании подобных детекторов спектрометры получают весьма компактные габаритные размеры: модуль электростатической оптики совместно с детекторным узлом представляют собой цилиндр высотой 100 мм и диаметром 70 мм. В зависимости от того, к каким электродам прикладывается потенциал представленная схема электростатической оптики позволяет обеспечить измерения функции распределения ионов и электронов в широком энергетическом диапазоне (от 10 эВ до 15 кэВ) и с полями зрения, близкими к 2π, что обеспечивает измерения параметров как солнечного ветра, так и ускоренных частиц в плазменном окружении планет и их спутников. Конструкция модуля электростатической оптики позволяет разместить электроды электростатического затвора за входным окном сканирующего устройства, что применительно к регистрации параметров ионов обеспечивает применение времяпролетной системы анализа частиц.

Благодаря своим компактным размерам, спектрометры могут устанавливаться в качестве полезной нагрузки не только на научных спутниках, но и на служебных космических аппаратах и наноспутниках.

6. ДЕТЕКТОР ЭНЕРГИЧНЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ

Детектор нейтральных атомов позволит получить информацию о массовом составе и пространственном распределении нейтральных частиц на различных участках орбиты космического аппарата, что позволит исследовать процессы пересоединения, происходящие в магнитосфере и хвосте Венеры, изучить взаимодействие нейтральных атомов и заряженных частиц

с индуцированной магнитосферой Венеры, процессы взаимодействия магнитосферных и ионосферных ионов низких энергий с нейтральными атомами.

Для проведения качественных измерений нейтральных атомов важно регистрировать не только их поток, но и массовый и энергетический состав. Данные параметры позволят определить происхождение зарегистрированных нейтральных атомов, исследовать их параметры на различных участках орбиты космического аппарата. Для проведения данных измерений разрабатывается детектор нейтральных атомов (ДНЧ), позволяющий регистрировать поток нейтральных частиц, осуществлять анализ их энергетического и массового состава. Кроме того, в отдельном режиме функционирования предложенная схема прибора позволяет проводить регистрацию параметров ионов плазменного окружения Венеры.

Принцип функционирования детектора нейтральных частиц основан на эффекте ионизации энергичных нейтральных атомов при столкновении с мишенью [13] и сочетает два типа анализа — электростатический (E/Q) для определения энергетического состава регистрируемых частиц и разделение частиц по соотношению V/Q в постоянном магнитном поле. Прибор имеет несколько прототипов — в частности, модуль мишени-ионизатора с аналогичным принципом функционирования используется в приборе АРИЕС-Л [6] и ЛИНА-Р для проекта *Луна-26*, а детекторный модуль схожей конструкции в сочетании с магнитной системой разрабатывался для ионного спектрометра ПИПЛС-Б в рамках проекта *Интергелиозонд* [14].

Рассмотрим строение и принцип функционирования электростатической оптики ДНЧ, структура которой, а также распределение частиц различных масс на детекторе представлены на рис. 3. Разными цветами показаны траектории движения частиц различных масс: Н (1 а.е.м.), He (4 а.е.м.), О (16 а.е.м.), N₂ (28 а.е.м.), Ar (40 а.е.м.).

После входного окна, ограниченного экранной сеткой, расположены запирающие электроды (1). Данный узел позволяет исключить попадание заряженных частиц космической плазмы в измерительный тракт прибора при регистрации нейтральных атомов. Ионизация нейтральных атомов происходит в результате их взаимодействия с узлом мишени-ионизатора (2). Образованные в результате данного взаимодействия ионы ускоряющим потенциалом

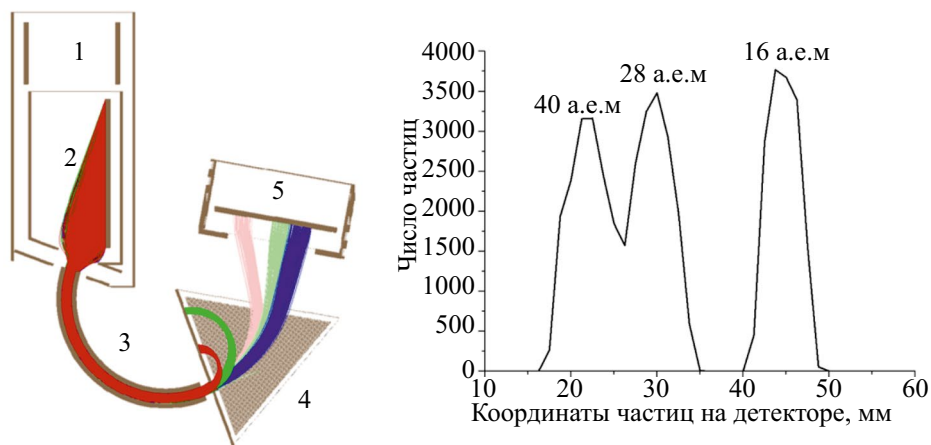


Рис. 3. Структура электростатической оптики детектора нейтральных атомов и распределение ионов различных масс на детекторе. 1 — запирающие электроды, 2 — мишень-ионизатор, 3 — электростатический анализатор, 4 — магнитный анализатор, 5 — координатно-чувствительный детектор.

вытягиваются в сторону электростатического анализатора (3), который проводит анализ их энергий по соотношению E/Q . После электростатического анализатора частицы попадают в магнитный анализатор (4), где происходит их разделение по соотношению V/Q . Частицы с различными скоростями, прошедшие через магнитную систему, попадают на различные области координатно-чувствительного МКП-детектора (5), позволяя по координате определить их скорость, и, соответственно, массу. Одним из преимуществ предложенной схемы прибора является возможность одномоментной регистрации частиц различной массы, что позволяет осуществлять быстрый анализ массового состава частиц.

Схема электростатической оптики прибора построена таким образом, что в определенном режиме работы позволяет осуществлять регистрацию ионов солнечного ветра или космической плазмы. В данном режиме работы запирающие электроды (1) могут использоваться как сканирующее устройство для выбора направления поля зрения, а потенциал на мишени (2) — для фокусировки потока ионов на входное окно электростатического анализатора. Таким образом, детектор может осуществлять не только регистрацию нейтральных атомов, но и в ряде случаев служить вспомогательным прибором для детектирования параметров ионов.

Моделирование параметров работы детектора нейтральных частиц показало, что в текущей конфигурации он способен осуществлять регистрацию параметров потока нейтральных атомов в диапазоне масс от 1 до 40 а.е.м. с разрешением

$M/dM = 5$. Поле зрения прибора представляет собой конус с раствором 10° по азимутальному углу и $\pm 20^\circ$ по полярному углу.

Наиболее близким по научным задачам и техническим характеристикам является семейство научных приборов SARA (Sub-keV Atom Reflecting Analyzer (SARA), LENA, ENA), которые разрабатывались в рамках космической миссии *Chandrayaan-1* [15]. SARA — спектрометр, предназначенный для детектирования низкоэнергичных нейтральных атомов в диапазоне энергий от 10 эВ до 3 кэВ.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование плазменного окружения Венеры по-прежнему представляет значительный научный интерес, тем более, что в настоящее время на орбите планеты нет действующих космических аппаратов, оснащенных приборами для регистрации параметров космической плазмы. Несмотря на многолетнюю успешную работу аппаратуры на борту *Venus Express*, неисследованными остаются обширные области плазменного окружения планеты, кроме того, современная электронно-компонентная база и новые плазменные приборы позволят получить более детальные и точные измерения параметров плазмы и нейтральных частиц.

Представленные в данной статье модели приборов имеют высокий уровень готовности — значительная часть их узлов имеет прототипы, прошедшие полный цикл лабораторных испытаний, а в ряде случаев получивших летную

квалификацию. Проведенное моделирование показало достижимость требуемых аналитических характеристик. Отдельные приборы, например, спектрометр электронов, могут быть масштабированы и использованы для различных космических миссий, в которых требуется измерение параметров плазмы с помощью компактных и быстрых спектрометров.

Для проведения полноценных измерений, полный состав плазменного комплекса должен включать в себя также магнитометр и датчики параметров солнечного ветра. Опыт работы отечественных космических миссий показывает, что данные приборы также могут быть реализованы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Russell C.T., Vaisberg O.* In *Venus* / ed. by Hunton D.M. et al. Univ. of Arizona Press, Tucson, 1983. P. 873–94.
2. *Zelenyi L.M., Malova H.V., Artemyev A.V. et al.* Thin current sheets in collisionless plasma: equilibrium structure, plasma instabilities, and particle acceleration // *Plasma Phys. Rep.* 2011. V. 37. P. 118–160. DOI:10.1134/S1063780X1102005X
3. *Vaisberg O.L., Zeleny L.M.* Formation of the plasma mantle in the Venusian magnetosphere // *Icarus*. 1984. V. 58. P. 412–430. DOI:10.1016/0019-1035(84)90087-3.
4. *Barabash S., Fedorov A., Sauvaud J.J. et al.* The loss of ions from Venus through the plasma wake // *Nature*. 2007. V. 450. P. 650–653. DOI:10.1038/nature06434
5. *Futaana Y., Stenberg Wieser G., Barabash S. et al.* Solar Wind Interaction and Impact on the Venus Atmosphere // *Space Sci. Rev.* 2017. V. 212. P. 1453–1509. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0362-8>
6. *Вайсберг О.Л., Журавлев Р.Н., Моисеенко Д.А. и др.* Широкоугольный ионный энерго-масс-анализатор АРИЕС-Л // *Астрономический вестник*. 2021. Т. 55. № 6. С. 575–588. DOI: 10.31857/S0320930X21060116
7. *Orsini S., Livi S.A., Lichtenegger H. et al.* SERENA: Particle Instrument Suite for Determining the Sun-Mercury Interaction from BepiColombo // *Space Sci. Rev.* 2021. V. 217. Iss. 11. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00787-3>
8. *Wieser M., Barabash S., Wang X.-D. et al.* The Advanced Small Analyzer for Neutrals (ASAN) on the Chang'E-4 Rover Yutu-2 // *Space Sci. Rev.* 2020. V. 216. Iss. 73. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00691-w>
9. *Wurz P., Wieser M.* Production of a 10 eV–1000 eV neutral particle beam using surface neutralization // *Meas. Sci. Technol.* 2005. V.16. P.2511–2516. DOI:10.1088/0957-0233/16/12/016
10. *Niehus H., Heiland W., Taglauer E.* Low-energy ion scattering at surfaces // *Surface Science Reports*. 1993. V. 17(4–5). P. 213–303. DOI:10.1016/0167-5729(93)90024-j
11. *Young D.T., Burch J.L., Gomez R.G. et al.* Hot Plasma Composition Analyzer for the Magnetospheric Multiscale Mission // *Space Science Reviews*. 2014. V. 199(1–4). P. 407–470. DOI:10.1007/s11214-014-0119-6
12. *Halekas J.S., Lin R.P., Mitchell D.L.* Large negative lunar surface potentials in sunlight and shadow // *Geophysical Research Letters*. 2005. V. 320(9). DOI:10.1029/2005GL022627
13. *Wurz P., Scheer J., Wieser M.* Particle Scattering off Surfaces: Application in Space Science // *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*. 2006. V. 4. P. 394–400. DOI:10.1380/ejssnt.2006.394
14. *Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Митюрин М.В. и др.* Масс-анализатор ионов солнечного ветра ПИПЛС-Б для проекта “ИНТЕРГЕЛИОЗОНД” // *Приборы и техника эксперимента*. 2019. № 5. С. 96–99. DOI: 10.1134/S0032816219050227
15. *Bhardwaj A., Barabash S., Futaana Y. et al.* Low energy neutral atom imaging on the Moon with the SARA instrument aboard Chandrayaan-1 mission // *J. Earth Syst. Sci.* 2005. V. 114. Iss. 6. P. 749–760. DOI:10.1007/BF02715960