

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Моисеенко Дмитрий Александрович

**ЭНЕРГО-МАСС АНАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ
ПЛАЗМЫ И МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЫЛИ.
МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ.**

Специальность 01.03.03 – «Физика Солнца»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), отдел Физики космической плазмы (№54).

Научный руководитель

Вайсберг Олег Леонидович
доктор физ.-мат. наук, профессор,

Официальные оппоненты

Гальпер Аркадий Моисеевич
доктор физ.-мат. наук, профессор,
НИЯУ МИФИ, Институт Космофизики, директор.

Ефимов Анатолий Иванович
кандидат технических наук, ст. научный сотрудник,
ФИРЭ РАН, ведущий научный сотрудник.

Новиков Лев Симонович
доктор физ.-мат. наук, профессор,
НИИЯФ МГУ, главный научный сотрудник.

Защита диссертации состоится «16» октября 2019 г. в 16:45 на заседании диссертационного совета МГУ.01.05 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: ауд. 2-15, 19 корпус МГУ, Ленинские горы, д.1, стр.5, 119991, Москва.

E-mail: nav19iv@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/227654622/>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук



Н.А. Власова

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности проблемы

В диссертации представлены результаты работ автора по созданию ионных энерго-масс анализаторов для исследования Солнца, межпланетной среды и околопланетного пространства – от постановки задачи космического эксперимента, создания численных моделей и лабораторных макетов, участия в разработке и изготовлении приборов, их настройке и испытаниях и до разработок методик проведения эксперимента с использованием изготовленных образцов приборов.

Изучение источников солнечного ветра, механизмов нагрева ионных компонентов солнечного ветра, измерения электронной температуры короны являются актуальной задачей. Особый интерес представляет проведение измерений солнечной плазмы с близких расстояний от Солнца и с выходом из плоскости эклиптики в рамках проекта Интергелиозонд. Для осуществления этой задачи разрабатывается энерго-масс спектрометр ПИПЛС-Б, предназначенный для определения характеристик солнечного ветра: ионного и зарядового состава, скорости, температуры, концентрации и функции распределения по скоростям. Данные, получаемые прибором, могут быть использованы в том числе и для мониторинга космической погоды, исследований параметров магнитосфер планет.

Изучение процессов взаимодействия солнечного ветра с реголитом на поверхности Луны, исследование характеристик вторичных и отраженных ионов и нейтральных частиц является актуальной научной задачей в рамках развития лунной космической программы. Для решения этой задачи создан ионный энерго-масс анализатор АРИЕС-Л с широким полем зрения и функцией регистрации потока нейтральных частиц. В рамках проекта Луна-25 прибор будет выполнять задачи исследования реголита и экзосферы Луны.

Автоматизация лабораторных испытаний образцов приборов также является актуальной задачей в связи с усложнением самих приборов и возрастающими требованиями к объемам испытаний. Использование автоматизированных рабочих мест позволяет сократить время, затрачиваемое на отработки приборов, получить достоверную и подробную информацию о параметрах функционирования приборов.

Измерение пылевой компоненты, ее распределения по массам и элементному составу в межпланетной среде является важной задачей для понимания эволюции солнечной системы, а также других звездных систем. Учитывая то, что космический аппарат Интергелиозонд будет приближаться к Солнцу до расстояния ~ 0.3 а.е. и будет выходить за пределы плоскости эклиптики, измерения детектора пылевых частиц ПИПЛС-А позволят

получить новую научно значимую информацию о пыли в Солнечной системе. Кроме исследований в рамках проекта Интергелиозонд прибор может быть использован в ходе других межпланетных миссий.

Цели и задачи диссертационной работы, объект и предмет исследования

- Создание и исследование характеристик электронно-оптической схемы спектрометра ионов солнечного ветра для проекта Интергелиозонд, создание и испытания детектора спектрометра ионов.
- Разработка методик и проведение лабораторных настроек и калибровок конструкторско-доводочного и штатного образцов ионного энерго-масс анализатора АРИЕС-Л. Определение аналитических характеристик образцов прибора. Планирование научных измерений с помощью прибора.
- Создание аппаратно-программного комплекса для испытаний плазменных приборов.
- Разработка электронно-оптической схемы пылеударного масс-спектрометра, создание и функциональные испытания лабораторного прототипа пылеударного спектрометра.

Научная новизна работы

1. Разработана модель нового типа плазменного энерго-масс анализатора ПИПЛС-Б для проекта Интергелиозонд, предназначенного для изучения ионного и зарядового состава солнечного ветра и его источников в солнечной короне. Оригинальная конструкция прибора обеспечивает одномоментную регистрацию массового состава ионов выбранной энергии с высоким энергетическим ($\Delta E/E \leq 5\%$) и массовым ($M/\Delta M = 60$) разрешением в широком энергетическом диапазоне от 0.7 до 20 кэВ. Изготовлен и испытан оригинальный детекторный узел прибора.
2. Разработана и внедрена методика настроек модулей электронной оптики ионного энерго-масс анализатора АРИЕС-Л, позволившая обеспечить поле зрения прибора, близкое к 2π с высоким для приборов такого типа угловым разрешением: 40° по азимутальному углу и не хуже 30° по полярному. Проведены лабораторные испытания, отработка и настройки конструкторско-доводочного и штатного образцов прибора АРИЕС-Л, выполнено подробное исследование их аналитических характеристик. Показана способность прибора детектировать ионы в диапазоне энергий от 10 эВ до 5000 эВ с массовым разрешением $M/\Delta M$ не хуже 30. Эти характеристики не уступают, а в части параметров — превосходят значения, полученные для предшественников прибора на космических аппаратах Фобос-Грунт и

VeriColombo. Прибор прошел полный цикл испытаний, подтверждающих его готовность к работе на космическом аппарате Луна-25.

3. Создан аппаратно-программный комплекс (АПК) для лабораторных отработок плазменных приборов. Для автоматизированного управления рабочими местами разработано специальное программное обеспечение. АПК позволяет выполнять подробную проверку, настройку и калибровку ионных энерго-масс спектрометров с широким полем зрения, что значительно повышает достоверность научной информации, получаемой с этих приборов в ходе космического эксперимента. Использование комплекса позволяет радикально сократить время, затрачиваемое на исследования характеристик приборов.
4. Разработана физическая схема пылеударного масс-спектрометра ПИПЛС-А для проекта Интергелиозонд, изготовлен и испытан лабораторный прототип прибора. Прибор позволяет определять полный набор характеристик межпланетных и межзвездных пылевых частиц: массу, заряд, элементный состав в высоком массовом разрешении $M/\Delta M = 50$.

Теоретическая и практическая значимость, внедрение результатов работы

В процессе работы над диссертацией создан экспериментальный и методический задел для создания научных приборов в рамках космических проектов Интергелиозонд, Луна-26, Луна-27, Резонанс, Странник и перспективных направлений в области малых космических аппаратов.

Разработанные электронно-оптические схемы ионного спектрометра ПИПЛС-Б и пылеударного спектрометра ПИПЛС-А использованы при создании конструкторских моделей и лабораторных прототипов приборов. Спектрометры входят в состав научной аппаратуры проекта «Интергелиозонд». Кроме исследований в рамках проекта Интергелиозонд приборы могут быть использованы в ходе других межпланетных миссий. Примером одной таких задач для пылеударного спектрометра ПИПЛС-А является исследование распределений по высоте пылевых частиц на орбите Луны. Спектрометр ионов ПИПЛС-Б может быть использован для регистрации параметров солнечного ветра в экспериментах по мониторингу космической погоды и при измерениях плазмы в магнитосферах планет.

Достигнутые характеристики спектрометра ионов АРИЕС-Л позволят осуществить запланированные измерения в рамках космической миссии Луна-25 и провести анализ и интерпретацию научных данных с высокой достоверностью. Разработанные методики лабораторных отработок прибора будут применены при настройках и калибровках

спектрометров аналогичной конструкции, создаваемых в рамках космических миссий Луна-26 (орбитальный аппарат), Луна-27 (посадочный аппарат) и Странник (магнитосферный эксперимент).

Созданный аппаратно-программный комплекс был успешно использован при настройках, калибровках и лабораторных отработках образцов прибора АРИЕС-Л в рамках проекта Луна-25. Данный комплекс будет использован для работ с приборами в рамках проектов Луна-26, Луна-27, Странник, Резонанс.

Методология диссертационной работы

Разработка компьютерных моделей электронно-оптических схем создаваемых приборов и расчет их ожидаемых характеристик проводились с использованием программного обеспечения SIMION 8.0. На основе проведенного моделирования были определены основные аналитические параметры приборов, составлены исходные данные для разработки конструкторских моделей спектрометров, выполнены корректировки ранее изготовленных элементов электронной оптики приборов.

Лабораторные исследования характеристик создаваемых приборов, создание испытательной базы, испытания, настройка и калибровка разработанных приборов — один из важнейших этапов подготовки космических экспериментов, требующий внедрения автоматизированных испытательных систем.

Для автоматизации процессов лабораторных отработок приборов использовались системы сбора и обработки информации и модульные приборы на базе шасси PXI производства National Instruments. Эти устройства могут быть использованы для решения широкого спектра задач, связанных с проведением лабораторных тестирований, позволяя оперативно менять как конфигурацию оборудования, так и функционал программного обеспечения в зависимости от поставленных задач. Разработка программного обеспечения, используемого при автоматизации рабочих мест и создании аппаратно-программного комплекса велась в среде LabVIEW 2012.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оригинальная схема ионного энерго-масс анализатора ПИПЛС-Б обеспечивает одномоментную регистрацию массового спектра тяжелых ионов выбранной энергии, позволяет проводить измерения зарядового состава тяжелых ионов солнечного ветра с высоким энергетическим и массовым разрешением ($\Delta E/E \leq 5\%$, $M/\Delta M = 60$) в диапазоне энергий от 0.7 до 20 кэВ.
2. Оптимизация конструкции электронно-оптической схемы и внедренные методики настроек полей зрения ионного энерго-масс анализатора АРИЕС-Л позволили достичь одномоментного поля зрения для ионов выбранной энергии, близкого к 2π , с высоким угловым разрешением: 40° по азимутальному углу и 30° по полярному с высоким энергетическим и массовым разрешениями ($\Delta E/E = 3\div 13\%$, $M/\Delta M > 30$), что в рамках миссии Луна-25 обеспечит одновременный мониторинг параметров солнечного ветра и вторичных частиц с поверхности Луны.
3. Разработанные методики проведения автоматизированных лабораторных испытаний позволяют проводить подробные исследования характеристик приборов и их узлов, кардинально сокращают время отработок, значительно повышают качество получаемой приборами научной информации.
4. Конфигурация пылеударного масс-анализатора ПИПЛС-А обеспечивает регистрацию полного набора характеристик частиц межпланетной и межгалактической пыли: элементный состав с высоким разрешением ($M/\Delta M = 50$), массу, заряд, составляющую скорости движения.

Личный вклад:

В работе представлены результаты, полученные либо лично автором, либо при его определяющем участии.

Для ионного энерго-масс анализатора ПИПЛС-Б разработана компьютерная модель электронно-оптической схемы прибора, принято участие в создании конструкторской модели прибора и в разработке детектора. Проведены испытания детекторного узла прибора.

Для ионного энерго-масс анализатора АРИЕС-Л разработана подробная компьютерная модель модуля электронной оптики, проведены моделирование и корректировки дефектов оптики, выработана методика настроек полей зрения прибора и устранения дефектов изображения, принято участие в операциях по сборке образцов прибора, подготовке и проведении термовакuumных и ресурсных испытаний. Проведены

настройки и калибровки, исследованы аналитические характеристики конструкторско-доводочного и штатного образцов прибора АРИЕС-Л.

Создан аппаратно-программный комплекс: выполнены работы по настройке и автоматизации рабочих мест, исследованы характеристики источников ионов и нейтральных атомов, разработана электронно-оптическая схема датчика контроля потока, проведены его калибровки. Проведены работы по изучению процессов рассеяния частиц на различных мишенях с использованием стенда нейтральных частиц.

Разработана компьютерная модель модуля электронной оптики пылеударного масс-спектрометра ПИПЛС-А, проработана структура прибора, принято участие в создании конструкторской модели. Проведены сборка, настройка и испытания прототипа спектрометра, определены основные характеристики времяпролетной схемы прибора.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность результатов моделирования работы электронно-оптических схем приборов подтверждаются экспериментальными данными, полученными в результате лабораторных испытаний прототипов и образцов приборов. Достоверность результатов испытаний и калибровок приборов обусловлена использованием в работе аттестованного и поверенного измерительного оборудования, применением автоматизированных методов тестирования, обеспечивающих контроль основных параметров условий функционирования исследуемых приборов.

Основные результаты диссертационного исследования были представлены в 22 докладах на российских и международных конференциях: «Физика плазмы в солнечной системе» (2013-2018), конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (2013-2018), Moscow Solar System Symposium (2013-2018), COSPAR MOSCOW 2014, Конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2017» в ГАО РАН, Промышленный саммит National Instruments (2014, 2018), «Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках SPEXP-2018», EGU-2018.

Публикации

По теме диссертационной работы были опубликованы в общей сложности 7 работ в рецензируемых журналах, индексируемых РИНЦ, Scopus, Web of Science. Полный список работ приведен в разделе **Публикации автора по теме диссертации**.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из четырех глав и двух приложений, общий объем рукописи составляет 132 страницы. Основной текст диссертации включает 62 рисунка и 6 таблиц. Общее количество цитируемой литературы составляет 87 источников. Приложения включают в себя 20 рисунков и 14 таблиц.

Содержание работы

Во Введении описываются основные цели работы, описаны научные задачи разрабатываемых и испытываемых приборов.

Глава 1 посвящена вопросам создания энерго-масс спектрометра ПИПЛС-Б для регистрации ионов солнечного ветра в проекте «Интергелиозонд». Основными задачами прибора ПИПЛС-Б являются измерения характеристик солнечного ветра: состава, скорости, температуры, концентрации. [A1, A2]. Подобные измерения позволят получать данные, необходимые для изучения источников солнечного ветра, механизмов нагрева ионных компонент солнечного ветра, измерений электронной температуры короны. В настоящее время разработаны и используются конструктивно сложные анализаторы, в которых состав солнечного ветра измеряется с помощью комбинированного анализа ионов в электрическом поле, времяпролетном анализаторе и измерением полной энергии с помощью полупроводникового детектора [1, 2, 3]. Для участия в проекте «Интергелиозонд» было принято решение разработать энерго-масс спектрометр, обладающий достаточно высоким энергетическим и массовым разрешением при сравнительно малом весе и простой конструкции.

Определение необходимых характеристик ионов солнечного ветра в приборе основано на сочетании двух типов селекции: электростатической и магнитной. Первая позволяет выбрать ионы с определенной величиной отношения энергии на единицу заряда E/Q , вторая – разделить ионы с выбранной энергией по отношению массы к заряду M/Q [4]. Подобные измерения позволяют разделить ионы по их зарядовому составу и определить их характеристики в солнечном ветре. Электронно-оптическая схема прибора и прохождение по ней ионов кислорода и железа с различными зарядовыми состояниями показаны на рисунке 1. Модуль электронной оптики включает в себя следующие элементы: сканирующее устройство (1), электростатический анализатор (2), дрейфовая трубка (3), магнитная система (4), координатный детектор (5).

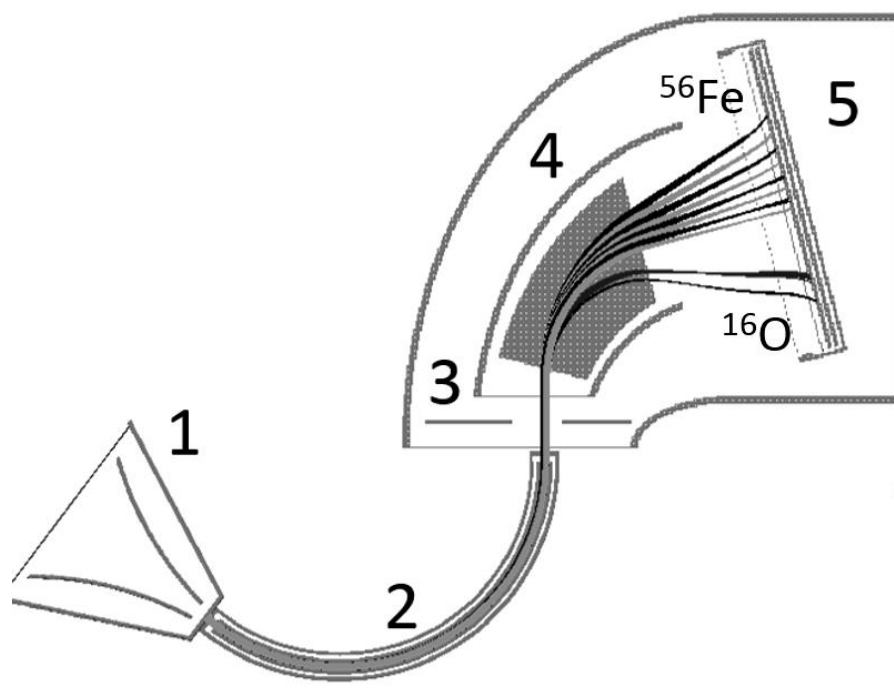


Рисунок 1. Компьютерная модель прибора ПИПЛС-Б. 1 – Сканирующее устройство; 2 – электростатический анализатор; 3 – дрейфовая трубка; 4 – магнитная система; 5 – координатно-чувствительный МКП детектор.

Для определения энергии частиц в приборе используется пять электростатических анализаторов (ЭСА) с углом раствора 127 градусов [5]. Выбранная геометрия ЭСА позволит получить энергетическое разрешение прибора $\Delta E/E \sim 5\%$ и обеспечить регистрацию ионов с энергиями до 20 кэВ/заряд. Использование нескольких ЭСА позволяет обеспечить поле зрения по азимутальному углу до 45° . Для обеспечения полей зрения до 90° по полярному углу в приборе используется сканирующее устройство (СУ), представляющее собой два симметричных электрода, расположенных на входе каждого ЭСА. Управление направлением визирования осуществляется подачей различных уровней напряжений на СУ. Разделение ионов по параметру M/Q производится системой из постоянных магнитов. Магнитная система состоит из параллельных магнитных пластин, соединенных магнитопроводом. В комбинации с ЭСА магнитный анализатор позволяет получить массовое разрешение $M/\Delta M \sim 60$.

Для регистрации ионов используется координатно-чувствительный детектор. Информация о координате прихода ионов позволяет сделать выводы о распределении потока ионов с заданным E/Q по параметру M/Q . Были проведены работы по изготовлению, настройке и испытаниям детекторного узла ПИПЛС-Б. Разработанный детекторный узел изготовлен на основе микроканальных пластин с размерами 70x90 мм. Для определения координаты прихода частицы на детектор используется анод клинья-

полосы с пятью группами коллекторов. Коллектора каждой группы отвечают за регистрацию координаты частицы, прошедшей по соответствующему анализатору.

Расчетные характеристики прибора ПИПЛС-Б приведены в таблице 1. Оценка данных характеристик была сделана на основе компьютерного моделирования электронно-оптической схемы прибора.

Таблица 1. Расчетные характеристики прибора ПИПЛС-Б

Диапазон энергий, кэВ	0.7...20
Массовый диапазон, М/Q	2...9
Массовое разрешение, М/ΔМ	60
Энергетическое разрешение ΔЕ/Е	5 %
Полный угол зрения	до 45°x90°
Угловое разрешение	~2°
Габариты анализатора, мм	230x170x120
Масса, ориентировочно, кг	3.5

Характеристики прибора соответствуют уровню современной научной аппаратуры и позволяют решать поставленные научные задачи.

Глава 2 посвящена результатам работ с ионным энерго-масс спектрометром АРИЕС-Л, созданного в рамках миссии Луна-25 для исследования реголита методами вторичной ионной масс-спектрометрии и изучения процессов взаимодействия солнечного ветра с поверхностью Луны. В главе использованы результаты, опубликованные в работах А2, А3 и А4.

Прибор АРИЕС-Л сочетает комбинацию электростатического и времяпролетного элементов электронной оптики, что позволяет проводить анализ заряженных частиц по соотношению энергии к заряду E/Q и выполнять массовый анализ потока частиц в диапазоне энергий от 10 эВ до 5000 эВ [А3]. Конструкция прибора позволяет регистрировать частицы в поле зрения, близком к 2π [6]. Принцип действия конвертера нейтральных частиц основан на ионизации нейтральных атомов при их взаимодействии с поверхностью электрода-ионизатора [7; А4]. Для регистрации заряженных частиц используется координатно-чувствительный детектор на основе микроканальных пластин с анодом клинья-полосы [8]. Структура прибора приведена на рисунке 2.

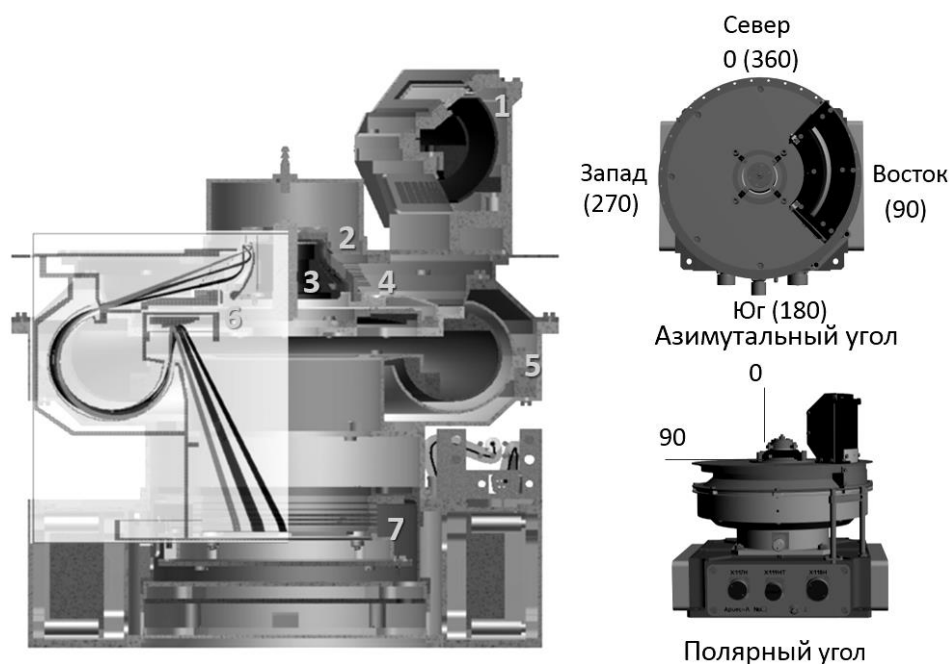


Рисунок 2. Структура и система координат прибора АРИЕС-Л. 1 – конвертер нейтральных частиц; 2 – входное окно модуля электронной оптики; 3 – зеркало М1; 4 – затвор времяпролетной схемы; 5 – электростатический анализатор; 6 – зеркало М2; 7 – координатно-чувствительный детектор.

Первые проверки изготовленных модулей электронной оптики прибора АРИЕС-Л показали значительное расхождение с расчетными данными. Наблюдалась значительная асимметрия изображения, поля зрения прибора вместо расчетных 0° - 90° по полярному углу составляли 0° - 40° .

Для определения причин столь значительного расхождения была разработана компьютерная модель, учитывающая конструктивные особенности прибора. Анализ этой модели позволил определить элементы конструкции, оказывающие наибольшее влияние на поля зрения прибора и выработать методику настроек модулей электронной оптики.

После настроек полей зрения и сборки КДО и ШО АРИЕС-Л были проведены функциональные испытания, направленные на определение основных аналитических характеристик прибора. Результаты выполненных проверок и сравнение фактических значений проверяемых параметров с требованиями к прибору [А5] и результатами аналогичных испытаний предшественников прибора – анализаторов ДИ (Фобос-Грунт) [9] и PICAM (VepiColombo) [10, 11] приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты функциональных испытаний КДО и ШО прибора АРИЕС-Л

Проверяемый параметр	Требуемое значение	КДО	ШО	ДИ	РІСАМ
Поле зрения по полярному углу, град.	0-60	0-88	0-80	0-80	0-65
Разрешение по полярному углу, град.	Не хуже 30	30	30	7.5*	30
Разрешение по азимутальному углу, град.	Не хуже 60	40	40	30*	60
Энергетическое разрешение, $\Delta E/E$	Не хуже 15%	От 2% до 14%	От 3% до 13%	От 7% до 13%	20%
Разрешение по массе, $M/\Delta M$	Не менее 15 для 40 а.е.м. (на энергии 1кэВ)	> 30	> 30	~25	50
Энергетический диапазон	150 - 4500 эВ	30 – 5000 эВ	10 – 5000 эВ	3 – 3000 эВ	100–3000 эВ
Регистрация нейтральных частиц	Да	Да эффективно сть $\sim 3 \cdot 10^{-7}$	Да, эффективно сть $\sim 2 \cdot 10^{-6}$	нет	нет

* Данные на основе компьютерного моделирования

После функциональных и прямо-сдаточных испытаний для ШО АРИЕС-Л было проведено детальное исследование аналитических характеристик прибора, заключавшееся в подробном изучении качества пропускания модуля электронной оптики, определении энергетического разрешения $\Delta E/E$ и массового разрешения $M/\Delta M$. Результаты проверок качества пропускания и энергетического разрешения прибора приведен на рисунке 3.

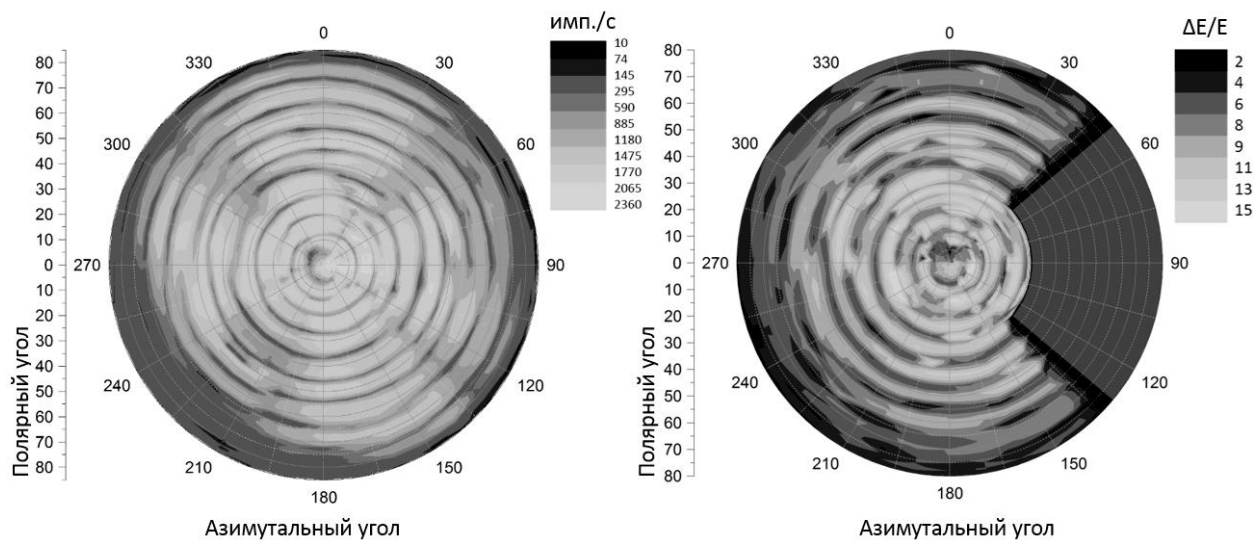


Рисунок 3. Зависимость качества пропускания и энергетического разрешения $\Delta E/E$ от полярного и азимутального углов.

Структура в виде колец, видная на рисунках, вызвана затенением потока частиц структурой электростатического затвора времяпролетной схемы прибора. Полученные зависимости будут использованы при расчете геометрического фактора прибора и для восстановления функции распределения регистрируемых прибором частиц.

Определение $M/\Delta M$ проводилась для массового пика аргона (40 а.е.м.) по полной ширине на полувысоте на энергии 500 эВ. На рисунке 4 приведены результаты проверки зависимости $M/\Delta M$ от полярного и азимутального углов.

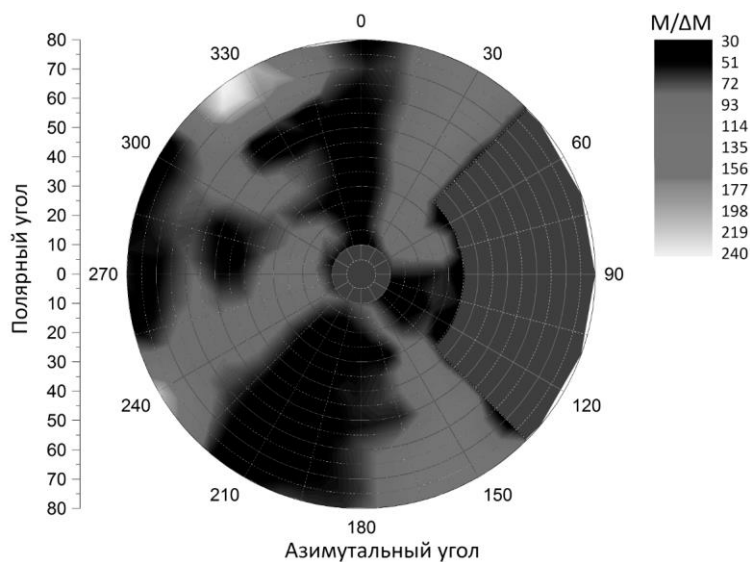


Рисунок 4. Зависимость $M/\Delta M$ от угла прихода частиц.

Разрешение $M/\Delta M$ зависит как от времени открытия затвора, так и от энергии регистрируемых частиц. Для четырех азимутальных углов (Север, Юг, Восток, Запад) была проверена зависимость массового разрешения от энергии частиц. Результат проверки приведен на рисунке 5.

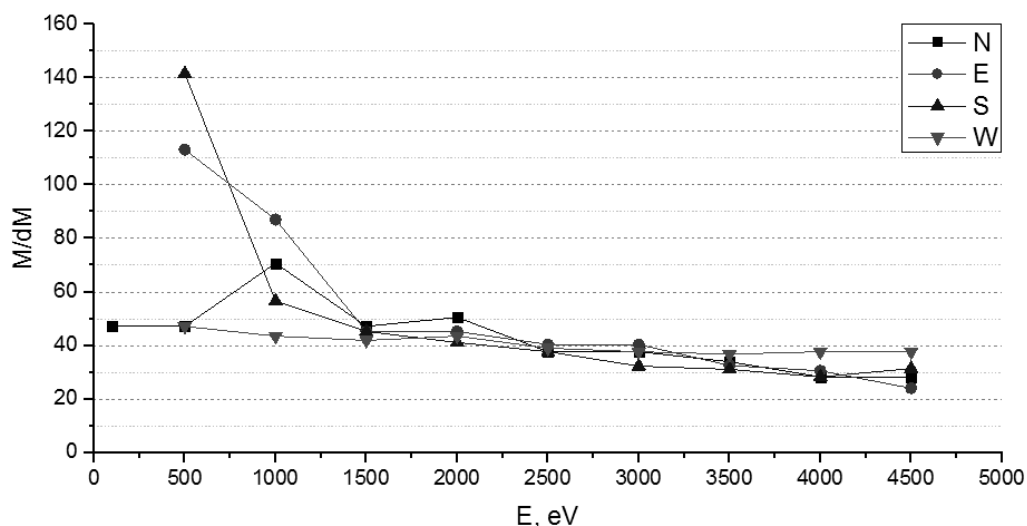


Рисунок 5. Зависимость массового разрешения прибора от энергии частиц при времени открытия электростатического затвора 15 нс.

Для обеспечения измерений заряженных частиц в различных диапазонах энергий и нейтральных атомов были разработаны и загружены в прибор рабочие таблицы, определяющие параметры работы электронной оптики прибора. Таблицы включают в себя как линейное, так и логарифмическое сканирование по энергиям и позволяют производить регистрацию частиц либо с высоким массовым разрешением, либо с лучшей чувствительностью.

Также в процессе проведения лабораторных отработок ШО АРИЕС-Л были разработаны циклограммы измерений, предназначенные для исполнения после посадки космического аппарата, и выполнены проверки функционирования прибора с их применением. Проводимые в период первой лунации измерения важны тем, что результаты работы прибора позволят получить информацию об условиях, в которых находится прибор, провести его летную квалификацию, сформировать циклограммы работы на КА для последующих измерений.

Циклограммы работ прибора составлены таким образом, чтобы с каждым включением прибора осуществлять постепенное расширение диапазона регистрируемых энергий, что снизит вероятность короткого замыкания в модуле электронной оптики, дав время на дегазацию аппарата и оседание пыли, поднятой с поверхности в результате работы двигателей. В процессе измерений планируется комбинировать работу прибора в режиме регистрации энергетического и массового спектров. Пример результата работы прибора по циклограмме приведен на рисунке 6.

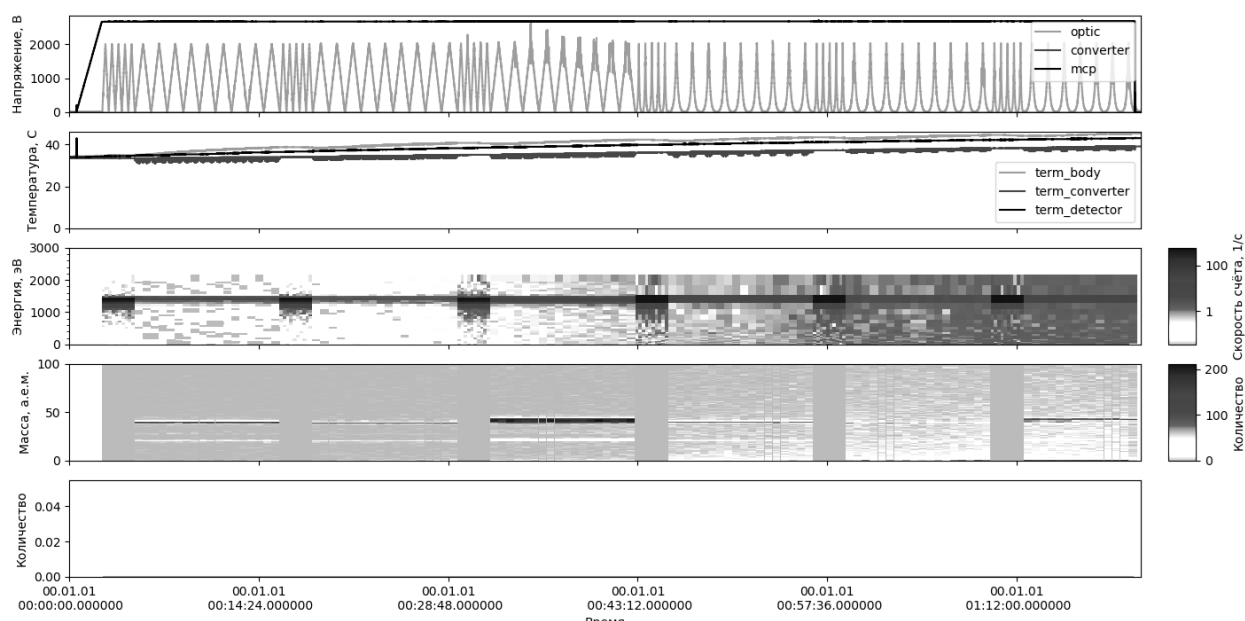


Рисунок 6. Циклограмма регистрации энергомасс-спектра в диапазоне 10-2000 эВ при работе по линейным и логарифмическим таблицам.

Отработки функционирования прибора при работе по циклограммам позволили определить быстродействие прибора: время регистрации полного энергетического спектра составляет 12,5 секунд.

Глава 3 посвящена вопросам создания аппаратно-программного комплекса (АПК) для испытаний образцов прибора АРИЕС-Л и аналогичных спектрометров с широким полем зрения, автоматизации различных испытаний образцов приборов и их узлов. В состав АПК входят рабочие места для проведения настроек, функциональных и термовакuumных испытаний образцов приборов. В главе использованы результаты, опубликованные в работах А4 и А5.

Рабочее место для испытаний образцов прибора АРИЕС-Л предназначено для проведения настроек, калибровок и исследований аналитических характеристик приборов и их узлов. В состав РМ входят вакуумная камера с безмасляной системой откачки, источники ионов и нейтральных атомов, датчик контроля потока ионов, лабораторные высоковольтные и низковольтные источники питания, манипулятор для размещения образца прибора под потоком ионов; система сбора и обработки информации. Структура РМ приведена на рисунке 7 [А5].

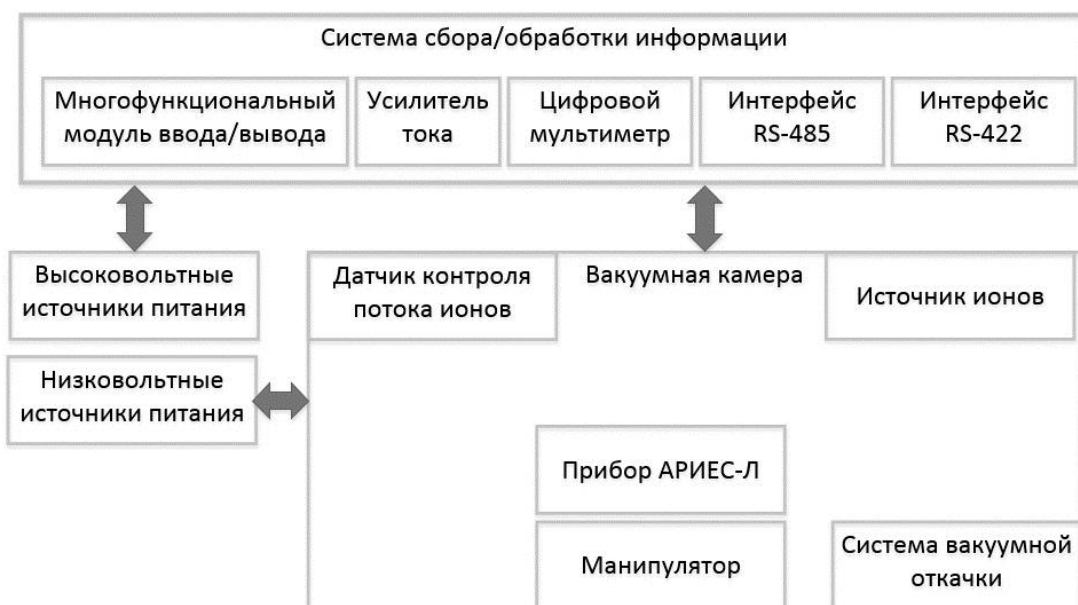


Рисунок 7. Структура аппаратно-программного комплекса для испытаний образцов прибора АРИЕС-Л

Для размещения прибора АРИЕС-Л внутри вакуумной камеры используется манипулятор, обеспечивающий вращение прибора под потоком ионов в двух плоскостях: поворот на 360° по азимутальному углу и наклон до 90° по полярному углу.

Для облучения испытываемого прибора потоком заряженных частиц с энергиями от 30 до 5000 эВ используется ионный источник с возможностью напуска газа. $\Delta E/E$ потока ионов зависит от энергии и составляет $\sim 2\%$ для энергий больше 700эВ. Стабильность потока ионов лучше 3%. Для контроля параметров тонного пучка был разработан датчик контроля потока, представляющий собой цилиндр Фарадея с восьмисегментным анодом.

Рабочее место также оснащено источником нейтральных атомов (ИН), принцип действия которого основан на процессе нейтрализации ионов при взаимодействии с поверхностью мишени-нейтрализатора [12]. ИН обеспечивает поток нейтральных атомов с плотностью потока до 900000 частиц/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$).

Для мониторинга и управления составными частями РМ используется система сбора и обработки информации, собранная на основе шасси National Instruments PXI-1075. Для обеспечения взаимодействия оператора с составными частями АПК и автоматизации набора проверок, выполняемых в процессе испытаний образцов разрабатываемых приборов, было разработано специальное программное обеспечение (ПО). ПО позволяет устанавливать параметры работы ионного источника, управлять параметрами системы газонапуска и вакуумной откачки, изменять положение манипулятора, управлять внешними источниками питания, контролировать поток заряженных частиц из источника

ионов, осуществлять мониторинг уровня вакуума в камере, собирать данные с испытываемого образца прибора. В текущей конфигурации программное обеспечение предусматривает проведение трех автоматических тестов: проверку поля зрения прибора, подбор оптимальных потенциалов для электронной оптики испытываемого образца, проверку энергетического и массового разрешения прибора для набора полярных и азимутальных углов. По результатам выполнения теста формируется текстовый файл, содержащий результаты проверки и параметры состояние рабочего места.

АПК успешно применялся для проведения настроек и функциональных испытаний конструкторско-доводочного и штатного образцов энерго-масс спектрометра АРИЕС-Л в рамках проекта Луна-25.

Рабочее место для проведения термовакuumных испытаний является важной частью лабораторной базы для отработки космических приборов. РМ включает в себя вакуумную камеру со термостабилизируемым столиком и системой безмасляной откачки, аттестовано для проведения термовакuumных испытаний в диапазоне температур от -70°C до $+70^{\circ}\text{C}$. РМ оснащено источником ионов, что позволяет проверять детектирование частиц прибором в процессе термоциклирования. Для мониторинга состояния рабочего места, температуры узлов испытываемого прибора и управления питанием прибора в процессе проведения термовакuumных испытаний было разработано программное обеспечение. РМ также использовалось при проведении ресурсных испытаний КДО АРИЕС-Л. Автоматизация РМ позволила значительно упростить работу с установкой в части управления и мониторинга за состоянием прибора, облегчило учет времени термоциклирования и наработки прибора.

Программный комплекс для работы со стендом нейтральных частиц

Одной из задач прибора АРИЕС-Л является регистрация нейтральных атомов, выбиваемых потоком ионов с поверхности реголита. Для исследования процессов взаимодействия ионов и нейтральных атомов с поверхностями из различных материалов в лабораторных условиях использовалось специальное устройство - Стенд нейтральных частиц. Конструкция устройства позволяет освещать исследуемую мишень как потоком заряженных частиц, так и нейтральными атомами. Устройство включает в себя два независимых поворотных плеча, на одном из которых размещается мишень с исследуемым образцом материала и детектор первичных частиц, на втором – детектор вторичных частиц, оснащенный системой сеток, позволяющей проводить энергетический анализ заряженных частиц, выбиваемых с поверхности мишени. Схема включения

детекторов позволяет регистрировать нейтральные атомы и либо положительные, либо отрицательные ионы. Структура стенда показана на рисунке 8.

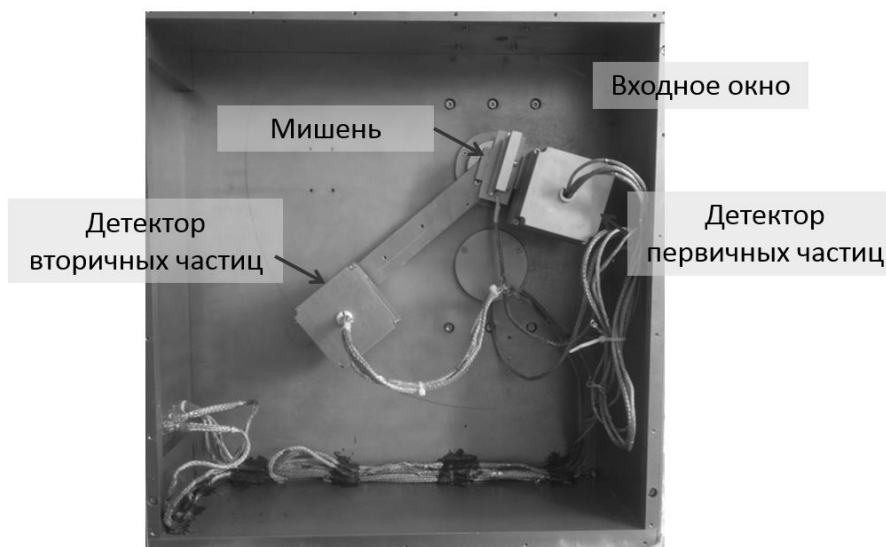


Рисунок 8. Устройство стенда нейтральных частиц

Было разработано программное обеспечение, отвечающее за управление элементами лабораторной установки и позволяющее в автоматическом режиме осуществлять сканирование по энергиям потока вторичных части для заданного диапазона положений мишени и детектора. Внедрение ПО позволило провести ряд работ по изучению спектров рассеяния вторичных нейтральных атомов и положительных и отрицательных частиц с поверхности мишеней при их облучении потоками ионов остаточного газа и нейтральными атомами. Примеры полученных распределений при облучении мишени потоками нейтралов приведены на рисунке 9.

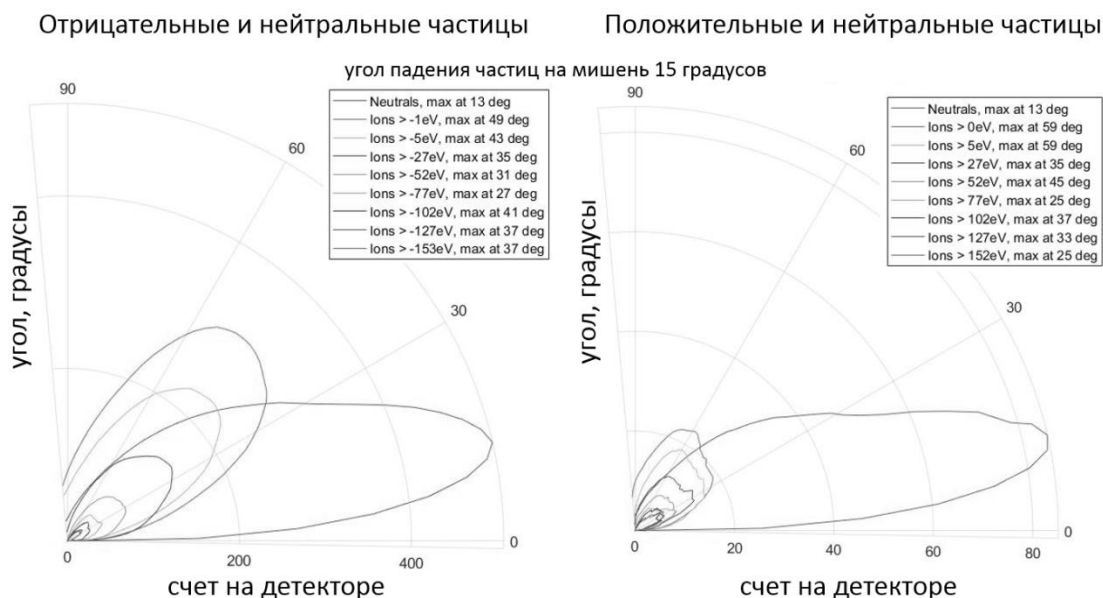


Рисунок 9. Угловые распределения частиц при облучении вольфрамовой мишени потоком нейтральных атомов.

Программа для автоматической проверки функционирования лабораторных прототипов спектрометров солнечного ветра была разработана для автоматизации проведения исследований характеристик лабораторных прототипов модулей электронной оптики спектрометров ионов и электронов, лишенных собственных модулей электроники и детекторных узлов [А6]. ПО обеспечивает управление внешними источниками питания, сбор данных с лабораторного координатно-чувствительного детектора и позволяет проводить автоматические проверки характеристик приборов.

Глава 4 посвящена вопросам создания прибора ПИПЛС-А для изучения пылевых частиц и микрометеоритов в рамках проекта «Интергелиозонд». В главе использованы результаты, опубликованные в работах А1 и А6.

Прибор представляет собой пылеударный масс-спектрометр с ионизацией частиц пыли в результате высокоскоростного взаимодействия с материалом мишени и способен определять следующие характеристики отдельных пылевых частиц: массу, продольную компоненту скорости, элементный и состав. Проведение этих измерений позволит получить информацию о пространственном распределении частиц пыли вблизи Солнца в плоскости эклиптики и вне ее [А1]; определить разнообразие по составу разных популяций частиц; провести анализ и интерпретацию полученных результатов по определению вклада в динамику частиц в солнечной системе от комет, астероидов и межзвездной пыли [13, 14, 15].

Для прибора разработана электронно-оптическая схема, обеспечивающая необходимые поля зрения и массовое разрешение при регистрации элементного состава пылевых частиц. На основе проведенного моделирования был разработан и изготовлен лабораторный прототип прибора, электронно-оптическая схема которого полностью соответствует штатной. Структура прибора показана на рисунке 10 [А7].

Детектор влета 1 определяет время попадания частицы в прибор и измеряет электрический заряд частицы [16]. На мишени-ионизаторе 5 происходит разрушение частицы, сопровождающееся образованием ионного облака, детектируется время удара, используемое для оценки скорости движения частицы и служащее стартовым импульсом для времяпролетной схемы, определяется масса частицы. Рефлектор 2 предназначен для синхронизации времени пролета ионов, линза 3 – для коррекции пучка ионов, детектор 4 – для регистрации потока и массового состава ионов.

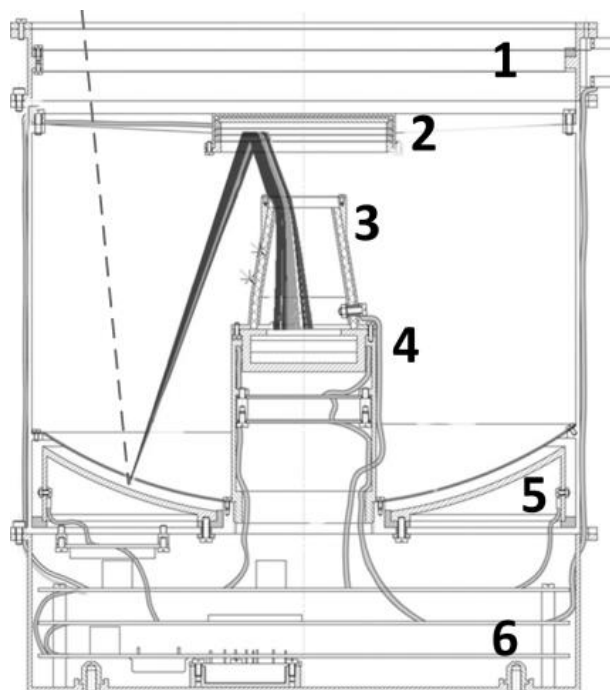


Рисунок 10. Структура прибора ПИПЛС-А. 1 – детектор влета; 2 – рефлектор; 3 – корректирующая линза; 4 – детектор на основе микроканальных пластин (МКП); 5 – мишень-ионизатор; 6 – модуль электроники. Показана траектория движения пылевой частицы и ионов, образованных в результате взаимодействия частицы с мишенью-ионизатором.

Прибор позволяет определить продольную составляющую вектора скорости пылевой частицы по времени между моментом влета частицы в прибор и ударом частицы о мишень. Детектор влета представляет собой систему из трех сеток, две из которых заземлены, а третья подключена к зарядочувствительному усилителю. Структура предлагаемого детектора влета может быть модифицирована с целью получения информации о векторе скорости детектируемых частиц [17]. При взаимодействии пылевой частицы с мишенью-ионизатором на высоких скоростях образуется плазменное облако из материала частицы и материала мишени. Это облако уносит заряд: $Q \sim mv^3$, где Q – регистрируемый заряд, m – масса частицы, v – ее скорость [18]. Соответственно на мишени образуется заряд противоположного знака, что позволяет определить массу частицы. Плазменное облако, состоящее из ионов частицы и мишени, вытягивается ускоряющим потенциалом, под которым находится мишень, в сторону рефлектора и затем регистрируется детектором на основе микроканальных пластин. На основании получаемых времяпролетных спектров ионов делается заключение о элементном составе материала пылевой частицы [19].

С изготовленным лабораторным прототипом были проведены работы по определению параметров времяпролетной электронно-оптической схемы прибора. В

условиях моделирования высокоскоростного удара пылевой частицы путем ионизации материала мишени лазерным импульсом были получены спектры материала мишени, проведена оценка массового разрешения $M/\Delta M = 50$ для массового пика, соответствующего цинку (64 а.е.м.) по полной ширине на полувысоте, что соответствует требованиям к эксперименту. Времяпролетный спектр, полученный в процессе испытаний электронно-оптической схемы, приведен на рисунке 11.

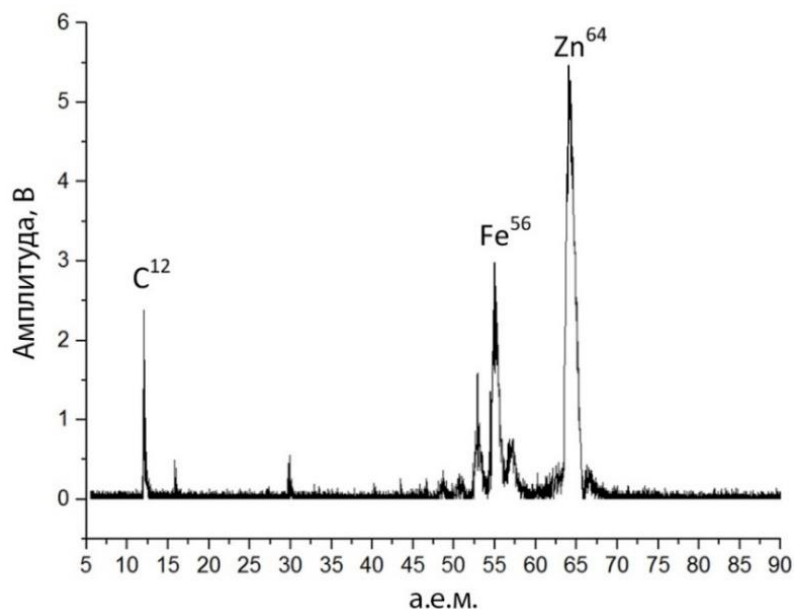


Рисунок 11. Времяпролетный спектр, регистрируемый лабораторным прототипом при ионизации материала мишени лазерным воздействием при моделировании высокоскоростного удара пылевой частицы.

Основные технические характеристики разрабатываемого прибора приведены в таблице 3. Проведенные работы показали достижимость заявленных параметров и возможность решения поставленных научных задач с помощью разрабатываемого прибора.

Таблица 3. Основные характеристики прибора ПИПЛС-А

Технические характеристики	
Вес	3,5 кг
Габариты	310x288x288 мм
Энергопотребление	до 10 Вт
Информативность	0,1-100 Мбит/сутки
Аналитические характеристики	
Измеряемые параметры	масса, элементный состав, скорость, заряд (оценка), поток
Диапазон масс	10^{-16} – 10^{-6} г
Диапазон скоростей	3–100 км/с
Массовое разрешение $M/\Delta M$	больше 30
Чувствительная площадь	$\sim 500 \text{ см}^2$
Поле зрения	45°

В **Заключении** перечисляются основные результаты, достигнутые за период работы над диссертацией: разработаны модели ионных и пылеударных анализаторов, проведены работы по изготовлению, настройкам, испытаниям и калибровкам создаваемых приборов и их узлов, создан аппаратно-программный комплекс для испытаний приборов, создан экспериментальный и методический задел для создания научных приборов в рамках космических проектов.

В **Приложении 1** к рукописи диссертации проводится сравнение результатов функциональных испытаний КДО и ШО ионного энерго-масс анализатора АРИЕС-Л. В **Приложении 2** представлено описание циклограмм работы прибора АРИЕС-Л, предназначенных для исполнения после посадки космического аппарата, приведены результаты проверки регистрации частиц штатным образцом прибора при работе по этим циклограммам в лабораторных условиях.

Публикации автора по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в журналах из списка Scopus, Web of Science, RSCI:

A1 Kuznetsov V.D., Zelenyi L.M., Zimovets I.V, Anufreychik K., Bezrukikh V., Chulkov I. V., Konovalov A. A., Kotova G. A., Kovrazhkin R. A., Moiseenko D. et al. The Sun and heliosphere explorer – the Interhelioprobe mission. // *Geomagnetism and Aeronomy*. (Impact Factor = 0.482) 2016. V.56(7). P.781–841. doi:10.1134/s0016793216070124

A2 Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Митюрин М.В., Моисеев П.П. Масс-анализатор ионов солнечного ветра для проекта «Интергелиозонд» // *Приборы и техника эксперимента* (Impact Factor = 0.613) 2019. №5. С.96-99. doi: 10.1134/S0032816219050227

A3 Vaisberg O., Berthellier J.-J., Moore T., Avanov L., Leblanc F., Moiseev P., Moiseenko D., et al. The 2π charged particles analyzer: All-sky camera concept and development for space missions // *J. Geophys. Res. Space Physics*. (Impact Factor = 2.75) 2016. V.121. P.11750–11765. doi:10.1002/2016JA022568

A4 Mamedov N.V., Sinelnikov D.N., Kolodko D.V., Soloviev N.A., Kalinenkov A.I., Kurnaev V.A., Vaisberg O.L., Shestakov A.Y., Moiseenko D.A. and Zhuravlev R.N. Laboratory testing of neutral particle converter device "Aries-L" // *Journal of Physics: Conference Series* (Impact Factor = 0.24) 2016. V.666 P.012032. doi:10.1088/1742-6596/666/1/012032

A5 Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Шестаков А.Ю. и др. Аппаратно-программный комплекс для настроек и калибровок ионных масс-спектрометров для космических миссий // *Приборы и техника эксперимента*. (Impact Factor = 0.613) 2019. № 3. С.52–62. doi: 10.1134/S0032816219020265

A6 Вайсберг О.Л., Шестаков А.Ю., Шувалов С.Д., Журавлев Р.Н., Моисеенко Д.А. Комплекс малогабаритных приборов для исследования космической погоды // *Изв. вузов. Приборостроение*. (Impact Factor RSCI = 0.496) 2018. Т. 61. No 5. С. 398—402 doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-398-402

A7 Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Глазкин Д.Н. Лабораторный прототип пылеударного масс-анализатора ПИПЛС-А для проекта «Интергелиозонд» // *Приборы и техника эксперимента*. (Impact Factor = 0.613) 2019. № 1. С.75–78. doi: 10.1134/S0032816218060113

Список литературы

- 1 Gloeckler, G., Balsiger, H., Buergi, et al. (1995). The solar WIND and suprathermal ion composition investigation on the WIND spacecraft. *Space Science Reviews*. 71(1-4). 79–124.
- 2 Galvin, A. B., Kistler, L. M., Popecki, et al. (2008). The Plasma and Suprathermal Ion Composition (PLASTIC) Investigation on the STEREO Observatories. *Space Science Reviews*. 136(1-4). 437–486.
- 3 Daoudi, H., Blush, L. M., Bochsler, P., et al. (2009) The STEREO/PLASTIC response to solar wind ions (Flight measurements and models), *Astrophys. Space Sci. Trans.* 5. 1-13.
- 4 Готт Ю.В., Курнаев В.А., Вайсберг О.Л. (2008). Курпускулярная диагностика лабораторной и космической плазмы МИФИ, Москва
- 5 Hughes, A. L., & Rojansky, V. (1929). On the Analysis of Electronic Velocities by Electrostatic Means. *Physical Review*. 34(2). 284–290.
- 6 Вайсберг О.Л., Аванов Л.А., Лейбов А.В. и др. (2005) Панорамный плазменный спектрометр - камера всего неба для заряженных частиц. // *Космические исследования*. Т.43. N5. - С. 390-394
- 7 Los, J., & Geerlings, J. J. (1990). Charge exchange in atom-surface collisions. *Physics Reports*, 190(3). 133–190.
- 8 Martin, C., Jelinsky, P., Lampton, M., Malina, R. F., & Anger, H. O. (1981). Wedge-and-strip anodes for centroid-finding position-sensitive photon and particle detectors. *Review of Scientific Instruments*. 52(7).
- 9 Vaisberg, O. L., Koinash, G. V., Moiseev, et al. (2010). DI-arises panoramic energy-mass spectrometer of ions for the Phobos-Grunt project. *Solar System Research*. 44(5). 456–467.
- 10 Eichelberger, H., Fremuth, G., Prattes, G et al. (2016). BepiColombo-MPO-SERENA-PICAM EMC measurements. 1-4. doi: 10.1109/AeroEMC.2016.7504548.
- 11 Orsini, S., Livi, S., Torkar, K., et al. (2010). SERENA: A suite of four instruments (ELENA, STROFIO, PICAM and MIPA) on board BepiColombo-MPO for particle detection in the Hermean environment. *Planetary and Space Science*. 58(1-2). 166–181.
- 12 Wieser, M., & Wurz, P. (2005). Production of a 10 eV–1000 eV neutral particle beam using surface neutralization. *Measurement Science and Technology*, 16(12), 2511–2516.
- 13 Landgraf, M., Baggaley, W. J., Grün, E. et al. (2000). Aspects of the mass distribution of interstellar dust grains in the solar system from in situ measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 105(A5). 10343–10352.
- 14 Dorschner, J., & Henning, T. (1995). Dust metamorphosis in the galaxy. *The Astronomy and Astrophysics Review*. 6(4). 271–333.
- 15 Burns, J. A., Lamy, P. L., & Soter, S. (1979). Radiation forces on small particles in the solar system. *Icarus*. 40(1). 1–48.
- 16 Srama, R., Altobelli, N., de Kam, J., et al. (2006). DUNE-eXpress – Dust astronomy with ConeXpress. *Advances in Space Research*. 38(9). 2093–2101. doi:10.1016/j.asr.2005.09.009
- 17 Grün, E., Srama, R., Altobelli et al. (2008). DuneXpress. *Experimental Astronomy*. 23(3). 981–999.
- 18 Willis, M. J., Burchell, M. J., Cole, M. J., & McDonnell, J. A. M. (2004). Influence of impact ionisation detection methods on determination of dust particle flux in space. *Planetary and Space Science*. 52(8). 711–725.
- 19 Grün, E., Srama, R., Krüger, H., et al. (2005). 2002 Kuiper prize lecture: Dust Astronomy. *Icarus*. 174(1). 1–14.