Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

en.

Моисеенко Дмитрий Александрович

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

Специальность 01.03.03 – «Физика Солнца»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,

профессор Вайсберг Олег Леонидович

Москва - 2019

Содержание

Введение	4
Глава 1. Ионный энерго-масс анализатор ПИПЛС-Б 17	7
1.1 Научные задачи эксперимента ПИПЛС-Б1	7
1.2 Прототип разрабатываемого прибора 17	7
1.3 Конструкция и принцип работы прибора ПИПЛС-Б 18	8
1.4 Расчетные характеристики прибора24	4
1.5 Разработка и испытания координатно-чувствительного детектора для прибора ПИПЛС-Б	5
1.6 Сравнение характеристик прибора ПИПЛС-Б с имеющимися аналогами20	б
Выводы главы 1	0
Глава 2. Лабораторные испытания ионного энерго-масс анализатора	
АРИЕС-Л	1
2.1 Научные задачи прибора АРИЕС-Л в рамках миссии Луна-25	1
2.2 Конструкция и принцип работы прибора АРИЕС-Л	1
2.3 Моделирование работы электронно-оптической схемы прибора	
АРИЕС-Л	5
2.4 Моделирование дефектов оптики	б
2.5 Функциональные испытания прибора АРИЕС-Л 40	0
2.6 Определение аналитических характеристик штатного образца прибора АРИЕС-Л	0
2.7 Работа прибора в составе космического аппарата 5	5
2.8 Проверка функционирования прибора по циклограмме в лабораторных условиях	0
Выводы главы 2	5
Глава 3. Аппаратно-программный комплекс для испытаний плазменных спектрометров	б
3.1 Рабочее место для функциональных испытаний образцов приборов АРИЕС-Л	б
3.2 Рабочее место для проведения термовакуумных испытаний образцов приборов	б

3.3 Программный комплекс для работы со стендом нейтральных частиц 79
3.4 Программа для автоматической проверки функционирования
лабораторных прототипов спектрометров солнечного ветра
Выводы главы 3
Глава 4. Пылеударный масс-спектрометр ПИПЛС-А 88
4.1 Научные задачи эксперимента ПИПЛС-А 88
4.2 Конструкция и принцип работы прибора ПИПЛС-А 88
4.3 Лабораторный прототип прибора ПИПЛС-А
4.4 Рабочее место для испытаний образцов прибора ПИПЛС-А 97
4.5 Прототипы прибора и сравнение характеристик прибора с аналогами 98
Выводы главы 4 100
Заключение 101
Список сокращений 105
Доклады на конференциях по теме диссертации 106
Публикации автора по теме диссертации 108
Библиографический список используемой литературы 109
Приложение 1. Сравнение результатов функциональных испытаний КДО и ШО АРИЕС-Л
Приложение 2. Циклограммы работы АРИЕС-Л 119

Введение

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.

Актуальность и степень разработанности проблемы

Изучение источников солнечного ветра, механизмов нагрева ионных компонентов солнечного ветра, измерения электронной температуры короны являются актуальной задачей, особый интерес представляет проведение измерений с близких расстояний от Солнца и с выходом из плоскости эклиптики в рамках проекта Интергелиозонд [A1].

Измерения относительного содержания и ионизационного состояния малых составляющих солнечного ветра, таких как O, Si и Fe, являются важным источником решения задач локализации областей в солнечной короне, являющихся источниками наблюдаемых потоков солнечного ветра [18]. Состав тяжелых ионов и параметры плазмы определяются источниками в солнечной короне [38]. Эти данные, а также функции распределения ионов по скоростям, позволяют исследовать механизмы ускорения солнечного ветра.

Пример измерения ионного и ионизационного состава солнечного ветра прибором SWICS на аппарате АСЕ [75] показан на рисунке 1 [42].





Известно, что распределение ионизационных состояний происходит в короне вблизи Солнца, и что оно позволяет определить электронную температуру в солнечной короне [41]. Тем самым, подобные измерения дают возможность связать наблюдаемые потоки солнечного ветра с его источниками при помощи моделей ускорения и распространения солнечного ветра с использованием наблюдений солнечного ветра и оптических изображений Солнца и короны [9, 20].

В настоящее время разработано и используется большое количество научных приборов, направленных на решение стоящей перед экспериментом задачи исследования солнечного ветра. Среди них наиболее близкими по измеряемым параметрам и решаемым научным задачам являются SWICS [39], PLASTIC [24], STICS [40], плазменные спектрометры FPI [63] и HPCA [87] проекта MMS [25], анализатор ионов солнечного ветра SWIA [48] в проекте MAVEN [51] и спектрометр SWEAP [53] в проекте Solar Probe Plus [66]. Упомянутые приборы обладают выдающимися аналитическими характеристиками и имеют летную квалификацию, подтвержденную годами работы в составе космических аппаратов, однако, большинство из них

сложны и дороги в изготовлении, либо обладают большим весом и энергопотреблением. Исходя из этого, было принято решение разработать энерго-масс спектрометр ПИПЛС-Б, обладающий высоким энергетическим и массовым разрешением при сравнительно малом весе и простой конструкции.

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.

Луна-25 – посадочный аппарат, оснащенный комплексом научной аппаратуры, основная научная задача которого – исследование физикохимических свойств лунного полярного реголита [15]. В рамках данной миссии ионный энерго-масс анализатор АРИЕС-Л позволит получить данные для исследования процессов взаимодействия солнечного ветра с реголитом [57], исследования реголита методом вторичной ионной масс-спектрометрии [52, 34], определения потока нейтральных атомов из реголита под воздействием заряженных частиц.

Основными источниками нейтральных атомов на Луне являются воздействие фотонов солнечного излучения на реголит [86], микрометеоритная активность [27] и рассеяние протонов солнечного ветра [31, 36]. Принцип работы конвертера нейтральных частиц, установленного на приборе АРИЕС-Л, основан на эффекте ионизации частиц в результате взаимодействия с мишенью-ионизатором [68], что позволит регистрировать нейтральные атомы с энергиями выше 10 эВ, основным источником которых являются ионы солнечного ветра.

Близкое к 2π поле зрения прибора в конфигурации посадочного аппарата Луна-25 позволяет осуществлять регистрацию как потоков ионов

солнечного ветра, так и вторичных частиц с реголита, что позволит получить данные о процессах взаимодействия первичных потоков заряженных частиц с реголитом в зависимости от угла падения, меняющегося в течение лунного дня. Кроме исследования процессов взаимодействия частиц с лунным реголитом, прибор позволит проводить измерения в магнитосферной плазме.

В работе представлены результаты анализа и моделирования работы электронной оптики с учетом особенностей конструкторской модели прибора, описывается процесс настроек модулей электронной оптики с целью получения требуемых аналитических характеристик, приводятся результаты лабораторных отработок и испытаний образцов прибора.

При создании современных приборов для исследования космического практически невозможно обойтись без пространства автоматизации процессов лабораторных отработок. Это связано как с усложнением самих приборов, так и с возрастающими требованиями к объемам испытаний. Внедрение специализированного программного обеспечения и создание автоматизированных рабочих мест позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на испытания, повысить качество получаемой информации об аналитических характеристиках приборов, детально изучить параметры функционирования узлов приборов, минимизировать влияние человеческого фактора результаты испытаний. Таким образом, автоматизация на лабораторных испытаний образцов приборов является актуальной задачей. В работе представлены результаты создания аппаратно-программного лабораторных отработок комплекса для ионных И электронных разрабатываемых миссий. С спектрометров, В ряде космических использованием этого аппаратно-программного комплекса проведены работы по настройкам и калибровкам конструкторско-доводочного и штатного образцов (КДО и ШО) ионного энерго-масс анализатора АРИЕС-Л.

Измерение пылевой компоненты, ее распределения по массам, а также элементного состава пылевых частиц и микрометеоритов является важной задачей для понимания эволюции солнечной системы, а также других звездных систем. Как известно, дискообразное облако межпланетной пыли (МП) окружает Солнце в эклиптической плоскости. Плотность МП в облаке уменьшается с увеличением гелиоцентрического расстояния и широты [59]. Предполагается, что внутренний радиус пылевого диска не имеет резкой границы [54]. Это связано с тем обстоятельством, что частицы пыли, имеющие различный элементный состав и соответственно различную температуру сублимации, будут испаряться на различных расстояниях по мере их приближения к Солнцу [А1].

Межпланетная пыль образуется в результате: 1) процессов соударения между космическими телами в поясе астероидов; 2) процессов сублимации вещества комет по мере их приближении к Солнцу; 3) прямой инжекции из межзвездного пространства [30]. Частицы пыли с размером менее 0.1 мкм быстро удаляются из солнечной системы в основном вследствие воздействия солнечного радиационного давления. Частицы большего размера медленно гравитационном поле по спиральным траекториям по двигаются в направлению к Солнцу, испытывая торможение в результате солнечного давления (эффект Пойтинга-Робертсона [64, 67]) радиационного И взаимодействия с солнечным ветром. После примерно 10⁴ лет пылевые частицы с типичным размером около 2 мкм подходят к Солнцу так близко, что начинаются процессы разогрева и сублимации их внешних слоев. В результате этого размер пылевых частиц уменьшается, и при достижении размера, при котором силы радиационного давления превысят гравитационные, частицы начнут уходить от Солнца по спирали [26]. Эти процессы зависят от свойств пылинок, а также от их химического состава.

Кроме того, межпланетная пыль может служить дополнительным источником для ионного состава космической плазмы [35]. При процессах дегазации, сублимации и распыления при ионной бомбардировке образуются

нейтральные частицы. Нейтральные атомы затем ионизуются и захватываются потоком солнечного ветра, внося вклад в надтепловую компоненту энергетического распределения солнечного ветра.

Для изучения пылевых частиц в рамках проекта Интергелиозонд разрабатывается пылеударный масс-спектрометр ПИПЛС-А с ионизацией частиц пыли в результате высокоскоростного взаимодействия с материалом мишени. Разрабатываемый прибор способен определять следующие характеристики отдельных пылевых частиц: массу, компоненту скорости, элементный состав.

Учитывая то, что КА Интергелиозонд будет приближаться до расстояния ~0.3 а.е. и будет выходить за пределы плоскости эклиптики, измерения пылеударного масс-спектрометра ПИПЛС-А позволят получить новую значимую информацию о пыли в Солнечной системе [16].

Проведение этих измерений позволит получить информацию о пространственном распределении частиц пыли вблизи Солнца в плоскости эклиптики и вне ее; 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 [А7]. Для прибора ПИПЛС-А был изготовлен и испытан лабораторный прототип модуля электронной оптики.

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 массспектрометра, 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 ($\Delta E/E \le 5\%$) 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 М/ΔМ не хуже 30. Эти характеристики не уступают, а в части параметров – превосходят значения, полученные для предшественников прибора на космических аппаратах Фобос-Грунт и BepiColombo. 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 высоким массовым разрешением M/ΔM = 50.

Теоретическая и практическая значимость 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 состав научной аппаратуры входят В 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 [50]. 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 [69]. 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 РХІ 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 проводилась в среде LabVIEW 2012 [23].

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 ($\Delta E/E \le 5\%$, $M/\Delta M = 60$) 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 ($\Delta E/E=3\div13\%$, $M/\Delta M > 30$), 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 (М/ΔМ = 50), массу, заряд, составляющую скорости движения.

Личный вклад автора:

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 электронной оптики, модель модуля 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 термовакуумных И ресурсных испытаний. Проведены настройки И калибровки, исследованы аналитические характеристики КДО и ШО АРИЕС-Л.

Создан аппаратно-программный комплекс: выполнены работы ПО настройке и автоматизации рабочих мест, исследованы характеристики нейтральных разработана источников ИОНОВ И атомов, электроннооптическая 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 результатов

Достоверность результатов моделирования работы электроннооптических 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.

Полный список докладов на конференциях приведен на страницах 106 и 107.

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.

Глава 1. Ионный энерго-масс анализатор ПИПЛС-Б

Глава написана с использованием материалов из работ автора А1 и А2.

1.1 Научные задачи эксперимента ПИПЛС-Б

Целью эксперимента ПИПЛС-Б является исследование источников солнечного ветра в солнечной короне путем определения ионизационных состояний тяжелых ионов, измерения температуры солнечной короны и последующего анализа.

Подобные измерения позволяют получать данные, необходимые для изучения источников солнечного ветра, механизмов нагрева ионных компонентов солнечного ветра, измерений электронной температуры короны, дадут возможность связать наблюдаемые потоки солнечного ветра с его источниками при помощи оптических изображений Солнца и короны и моделей ускорения и распространения солнечного ветра [A2].

1.2 Прототип разрабатываемого прибора

Прототипом электронно-оптической схемы прибора является энергомасс анализатор РИП-803, работавший на спутнике Прогноз-2 в начале 1970х годов. Принцип его действия заключался в том, что после анализа в цилиндрическом электростатическом анализаторе ионы попадали в дрейфовую трубку, расположенную в зазоре постоянного магнита [77]. Электрический потенциал на дрейфовой трубке менялся в соответствии с изменением потенциалов на обкладках ЭСА с тем, чтобы на расположенный на выходе вторичный умножитель попадали ионы выбранного вида и энергии. На рисунке 2 приведена структура прибора.



Рисунок 2. Структурная схема блока детектирования спектрометра РИП-803: 1 – коллиматор, 2 – пластины цилиндрического анализатора, 3 – световая ловушка, 4 – диафрагма, 5 – магнит, 6 – дрейфовая трубка, 7 – экранные сетки, 8 – ВЭУ, 9 – усилитель постоянного тока,10 – регистратор импульсов с ВЭУ [14] и спектры протонного и α-компонентов солнечного ветра по измерениям прибором РИП-803, май 1972.

РИП-803 последовательно измерял энергетические спектры протонов, альфа частиц и однократно ионизованного гелия. Прибор успешно работал в течение нескольких месяцев.

1.3 Конструкция и принцип работы прибора ПИПЛС-Б

Для определения необходимых характеристик ионов солнечного ветра в приборе используются комбинация двух типов разделения частиц: электростатического и магнитного. Первый позволяет выбрать ионы с определенной величиной отношения энергии на единицу заряда E/Q [49], второй – разделить ионы с выбранной энергией по отношению массы к заряду M/Q [12].

Конструктивно прибор представляет собой моноблок, состоящий из двух основных модулей: модуля электронной оптики и модуля электроники.

Электронно-оптическая схема прибора и прохождение по ней ионов кислорода и железа с различными зарядовыми состояниями представлены на рисунке 3. Модуль электронной оптики включает в себя следующие элементы: сканирующее устройство (1), электростатический анализатор (2), дрейфовая трубка (3), магнитная система (4), координатный детектор (5).



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

Электростатические анализаторы

Для выполнения анализа частиц по соотношению энергии к заряду в приборе используется пять электростатических анализаторов (ЭСА) с углом раствора 127 градусов [76]. Каждый ЭСА состоит из двух электродов и экрана. Управление режимами работы ЭСА осуществляется путем подачи биполярного напряжения на электроды – положительный потенциал на внешней полусфере, отрицательный – на внутренней. Напряжение на верхнем электроде может изменяться от -6 до -600 В, на нижнем от +6 до +600 В. На входе и на выходе ЭСА на корпусе экрана расположены диафрагмы диаметром 2 мм. Использование ЭСА с такими параметрами позволило получить энергетическое разрешение прибора $\Delta E/E \leq 5\%$ и обеспечить регистрацию ионов с энергиями до 20 кэВ/заряд. Энергетическое распределение частиц после прохождения ЭСА приведено на рисунке 4.





Центры выходных диафрагм расположены на одной линии, расстояние между ними соответствует расстоянию между центрами зазоров между магнитами в магнитной системе. Ось симметрии центрального ЭСА направлена вертикально вверх, оси остальных – наклонены относительно центральной на 10, 20, -10 и -20 градусов соответственно. Использование нескольких ЭСА позволяет расширить поле зрения прибора по азимутальному углу. Схема расположения выходов ЭСА приведена на рисунках 5 и 6.



Рисунок 5. Расположение выходов ЭСА.



Рисунок 6. Расположение электростатических анализаторов относительно дрейфовой трубки.

Сканирующее устройство

Для обеспечения необходимых полей зрения по полярному углу в приборе используется сканирующее устройство (СУ), представляющее собой два симметричных электрода, являющихся частями цилиндра, расположенные на входе каждого ЭСА. Управление направлением визирования осуществляется подачей различных уровней напряжений на СУ. Уровни напряжений, подаваемых на электроды, могут изменяться в пределах ±600 В, что позволяет отклонить поток ионов кислорода, движущихся под углом до ±45 градусов относительно оси входа.

Магнитная система

Разделение ионов по параметру M/Q производится системой из постоянных магнитов. Магнитная система состоит ИЗ параллельных магнитных пластин, соединенных магнитопроводом. Магнитные пластины по форме представляют сектор круга с вырезанным центром. Угол между гранями сектора составляет 60°. Напряженность магнитного поля в зазоре между пластинами составляет 8.5 кГаусс. В приборе используется магнитная система с пятью зазорами. Ширина зазора 5 мм, расстояние между центрами зазоров 10 мм. В комбинации с ЭСА магнитный анализатор позволяет получить массовое разрешение М/ Δ М не менее 60. Распределение частиц на МКП-детекторе с различным соотношением М/Q, прошедших через электронно-оптическую схему прибора, приведено на рисунке 7.



Рисунок 7. Пространственное распределение ионов кислорода и железа с различными зарядовыми состояниями на МКП-детекторе прибора.

Дрейфовая трубка

Для ускорения ионов перед пролетом через магнитную систему в приборе применяется дрейфовая трубка, представляет собой систему из трех электродов: корректирующего электрода на входе, ускоряющего электрода и доускоряющей сетки перед КЧД. Напряжение на ускоряющем электроде и на доускоряющей сетке одинаково и меняется в пределах от 0 до -14 кВ. Напряжение на корректирующем электроде в два раза меньше напряжения, подаваемого на ускоряющий электрод – от 0 до -7 кВ. Боковые и фронтальные стенки ускоряющего электрода соединены с ускоряющей сеткой для компенсации влияния рассеянных полей на траектории движения Корректирующий представляет собой ИОНОВ. электрод пластину с прямоугольной диафрагмой и предназначен для уменьшения влияния неоднородностей поля на пролет ионов.

Регистрация ионов

Для регистрации ионов используется координатно-чувствительный детектор (КЧД) на основе микроканальных пластин. Информация о координате прихода ионов позволяет сделать выводы о распределении потока ионов с заданным E/Q по параметру M/Q. Размеры КЧД – 60х70 мм.

Для определения координаты прихода частицы на детектор используется анод с пятью группами коллекторов. Коллекторы каждой группы отвечают за регистрацию координаты частицы, прошедшей по соответствующему анализатору. Структура одной группы коллекторов показана на рисунке 8. Коллекторы А1, представляющий собой клин, и В1 и B2, форму образующие ласточкиного хвоста, предназначены ДЛЯ определения координаты прихода частицы. Коллекторы С1 и С2 – полосы, служат для регистрации полного заряда, попавшего на анод. Расчет координаты прихода частицы для каждого из каналов осуществляется по формуле X = A1 / (A1 + B1 + C1 + B2 + C2).



Рисунок 8. Структура одной из пяти коллекторных групп анода детекторного узла прибора ПИПЛС-Б.

Использование пяти отдельных коллекторных групп позволило избежать явлений модуляций в распределении сигнала на детекторе [70], свойственным координатно-чувствительным детекторам с анодом клинья-полосы [55].

1.4 Расчетные характеристики прибора

Расчетные характеристики приведены в таблице 1. Данные характеристики были определены на основе компьютерного моделирования электронно-оптической схемы прибора в программе SIMION 8.0.

Таблица 1. Расчетные характеристики при	1бора
---	-------

Диапазон энергий, кэВ	0.720
Массовый диапазон, М/Q	29
Массовое разрешение, М/ДМ	60
Энергетическое разрешение ΔΕ/Ε	5 %
Полный угол зрения	до 45 ⁰ х90 ⁰
Угловое разрешение	~2 ⁰
Габариты анализатора, мм	230x170x120
Масса, ориентировочно, кг	3.5
Информативность, Кбит/с	1-200, зависит от режима работы

1.5 Разработка и испытания координатно-чувствительного детектора для прибора ПИПЛС-Б

В процессе создания прибора совместно со специалистами НПП «Астрон-Электроника» (НПП АЭ) были проведены работы по изготовлению, настройке и испытаниям детекторного узла ПИПЛС-Б. Разработанный детекторный узел был изготовлен на основе микроканальных пластин с размерами 70х90 мм. На рисунке 9 приведены фотографии изготовленного детекторного узла.



Рисунок 9. Фотографии координатно-чувствительного детектора для прибора ПИПЛС-Б

Для изготовленного прототипа детектора была проведена проверка функционирования под потоком частиц из ионного источника при установленной над входным окном детектора диафрагмой. Диафрагма представляла собой металлическую пластину с просверленными в ней отверстиями диаметром 1 мм. Пример получаемых изображений с каналов детектора приведен на рисунке 10. Испытания показали, что детектор предложенной конструкции позволит обеспечить требуемое разрешение прибора.



Рисунок 10. Регистрация распределения частиц от источника ионов на одном из каналов детектора при работе с установленной перед детектором диафрагмой.

1.6 Сравнение характеристик прибора ПИПЛС-Б с имеющимися аналогами

В данном разделе приводится сравнение характеристик разрабатываемого прибора с его аналогами.

Solar Wind Ion Composition Spectrometer (SWICS) предназначен для измерений массы и зарядов ионов солнечного ветра, определения его температуры и скорости [40]. Прибор включает в себя электростатический анализатор, времяпролетную систему и детекторы протонов и α-частиц. SWICS обеспечивает измерения E/Q, массы, полной энергии, определение атомной массы и ионизационного состояния.

Прибор Plasma and Supra-Thermal Ion Composition (PLASTIC) предназначен для проведения in situ исследований солнечного ветра и измерений низкоэнергетичных гелиосферных ионов в проекте NASA Solar Terrestrial Relations Observatory Mission (STEREO), который включает в себя

два космических аппарата (STEREO-A, STEREO-B) [29]. PLASTIC – времяпролетный энерго-масс спектрометр, спроектированный для определения элементного состава, ионизационных состояний и параметров потока основных ионов солнечного ветра в массовом диапазоне от водорода до железа. Прибор обеспечивает практически полный угол обзора в эклиптической плоскости и покрытие энергетического диапазона от ~0.3 до 80 кэВ. Прибор PLASTIC обеспечивает три типа измерений – E/Q, время пролета и измерение полной энергии частиц [37].

Прибор STICS разработан для проведения измерений массового состава и соотношения M/Q сверхэнергичных ионов, энергия которых выше верхнего предела энергий для прибора SWICS (30 keV/e). Прибор сочетает три типа анализа – электростатический, времяпролетный и измерение полной энергии ионов, не требует доускорения ионов после прохождения через электростатический анализатор. [40].

Прибор FPI (Fast Plasma Investigation) [63] предназначен для проведения измерений потоков магнитосферных ионов и электронов с чрезвычайно высоким временным разрешением. Прибор включает в себя четыре датчика электронов и четыре датчика ионов типа «топ-хэт» с углом обзора 180 градусов по азимутальному углу. Для обеспечения поля зрения по полярному углу используется система отклоняющих электродов. Размещение датчиков на борту космического корабля выполнено таким образом, обеспечивается поле зрения, близкое к 4π . Прибор обеспечивает измерения заряженных частиц в диапазоне энергий от 10 эВ до 30 кэВ.

Прибор HPCA (Hot Plasma Composition Analyzer) [87] – спектрометр ионов, основанных на принципе электростатического анализа заряженных частиц и обеспечивающий измерения массового состава регистрируемых ионов с помощью времяпролетного детектора на основе карбоновых фольг. Прибор имеет широкий динамический диапазон, позволяющий проводить измерения в условиях больших потоков протонов. Прибор обладает высоким

массовым разрешением М/ΔМ~100 и обеспечивает измерения частиц в диапазоне энергий от 10 эВ до 40 кэВ.

Анализатор ионов солнечного ветра SWIA [47] предназначен для заряженных потоков частиц на орбите Mapca. Прибор измерений представляет собой тороидальный энерго-анализатор с электростатическими отражателями, обеспечивающими поле зрения прибора 360°х90°. В состав прибора входит механический аттенюатор, позволяющий изменять динамический диапазон измерений. Прибор регистрирует частицы в диапазоне энергий от 5 эВ до 25 кэВ с разрешением $\Delta E/E = 14.5\%$.

Спектрометр SWEAP [53] – прибор, обеспечивающий измерения электронов и ионизованных частиц водорода и гелия. Датчик ионов прибора представляет собой «топ-хэт» с возможностью проведения времяпролетного анализа в диапазоне энергий от 5 эВ до 30 кэВ.

Сравнение их характеристик с прибором ПИПЛС-Б приведены в таблице 2.

	Технические характеристики		
Название прибора	Bec, кг	Потребление, Вт	Аналитические характеристики
SWICS	5.6	4	Поле зрения 4 ⁰ х45 ⁰ Диапазон измерений 0.5 – 30 кэВ; ΔЕ/Е = 4 – 6%; М/ΔМ=5
PLASTIC	11.4	8-12	Поле зрения 45 ⁰ х40 ⁰ Диапазон измерений 0.3 – 80 кэВ; ΔЕ/Е = 6-10%; М/ΔМ = 8
STICS	7.4	7	Поле зрения 4.5 ⁰ х156 ⁰ Диапазон измерений 8 – 226 кэВ; ΔЕ/Е = 5 – 15%; М/ΔМ=8

Таблица 2. Сравнение характеристик прибора ПИПЛС-Б с аналогами

Продолжение таблицы 2.

Название	Технические характеристики		істики
прибора	Bec, кг	Потребление,	Аналитические
		Вт	характеристики
FPI	6.2	6.9	4 датчика с общим полем
			зрения 4π; диапазон
			измерений 0.01-30 кэВ;
			$\Delta E/E = 11-15\%;$
	9	10.5	Поле зрения 22.5 ⁰ х360 ⁰
НРСА			Диапазон измерений 10 эВ-
			40 кэВ; ΔЕ/Е =0.17%;
			M/ΔM ~100
			Поле зрения 360 ⁰ х90 ⁰
SWIA	2.6*	1.75*	Диапазон измерений 5 эВ -
			25 кэВ; ΔЕ/Е =14.5%;
SWEAP	>3	>5	Поле зрения 247 ⁰ х120 ⁰
			Диапазон измерений 5 эВ –
			30 кэВ; ΔЕ/Е ~ 5%;
ПИПЛС-Б	3.5	5	Поле зрения 45 ⁰ х90 ⁰
			Диапазон измерений 0.7 – 20
			кэB; $\Delta E/E = 5\%$; $M/\Delta M = 60$

* Приводятся данные для одного датчика. В состав прибора входят 4 одинаковых датчика, расположенные в разных частях космического аппарата.

Выводы главы 1

Разрабатываемый прибор ПИПЛС-Б предназначен для изучения характеристик солнечного ветра: ионного и зарядового состава, скорости, температуры и концентрации. Проведение измерений с космического аппарата Интергелиозонд позволит получить новые научные данные об источниках солнечного ветра, исследовать механизмы нагрева ионных компонентов солнечного ветра, провести измерения электронной температуры короны. Прибор сочетает в себе электростатический метод разделения частиц по соотношению Е/Q и магнитный для разделения частиц выбранной энергии по соотношению М/Q и способен регистрировать заряженные частицы в диапазоне энергий от 700 эВ до 20 кэВ с высоким энергетическим и массовым разрешением. Использование координатночувствительного детектора для регистрации ионов, прошедших через модуль электронной оптики прибора, позволяет осуществлять одномоментную регистрацию массового состава тяжелых ионов солнечного ветра выбранной энергии, что существенно ускоряет время получения полного спектра частиц.

Разработана математическая модель работы прибора ПИПЛС-Б, проведено моделирование его работы, подтверждающее достижимость желаемых аналитических характеристик, выполнены работы по созданию конструкторской модели прибора, собран и испытан детекторный узел.

Сравнение аналитических характеристик разрабатываемого прибора с существующими аналогами позволяет выделить его основные преимущества: относительно компактные размеры и небольшой вес, высокое энергетическое и массовое разрешение, широкий энергетический диапазон, широкое поле зрения.

Проведенные расчеты и испытания позволяют сделать вывод, что прибор обладает характеристиками, необходимыми для решения поставленных экспериментальных задач и способен составить конкуренцию аналогичным энерго-масс спектрометрам.

Глава 2. Лабораторные испытания ионного энерго-масс анализатора АРИЕС-Л

Глава написана с использованием материалов из работ автора А2 и А3, А4.

2.1 Научные задачи прибора АРИЕС-Л в рамках миссии Луна-25

В рамках миссии Луна-25 задачами ионного энерго-масс анализатора АРИЕС-Л являются изучения взаимодействия солнечного ветра с реголитом, исследования реголита методом вторичной ионной масс-спектрометрии и определение потока нейтральных атомов из реголита под воздействием заряженных частиц.

Близкое к 2π поле зрения прибора позволяет осуществлять регистрацию как потоков ионов солнечного ветра, так и вторичных частиц с реголита, что дает возможность исследовать процессы взаимодействия первичных потоков заряженных частиц с реголитом в зависимости от угла падения, меняющегося в течение лунного дня.

Также прибор позволит проводить измерения в магнитосферной плазме.

2.2 Конструкция и принцип работы прибора АРИЕС-Л

Прибор АРИЕС-Л сочетает комбинацию электростатического и времяпролетного элементов электронной оптики, что, с одной стороны, позволяет проводить анализ заряженных частиц по соотношению энергии к заряду E/Q, с другой – выполнять массовый анализ потока частиц [58]. Диапазон регистрируемых энергий заряженных частиц – от 10 эВ до 5000 эВ [А3]. Отличительной особенностью прибора АРИЕС-Л является его электронно-оптическая схема, обеспечивающая одномоментную регистрацию заряженных частиц заданной энергии в поле зрения, близком к 2π [79]. Структура прибора приведена на рисунке 11. Работы по созданию прибора проводились специалистами ИКИ РАН совместно с НПП АЭ.



Рисунок 11. Структура прибора АРИЕС-Л и система координат, процессе проведения функциональных применявшаяся В испытаний. 1 – конвертер нейтральных частиц; 2 – входное окно модуля электронной оптики: 3 зеркало M1; 4 _ затвор времяпролетной схемы; 5 – электростатический анализатор; 6 – зеркало М2; 7 – координатночувствительный детектор на основе микроканальных пластин.

Принцип действия прибора следующий: положительно заряженные частицы, проходя через кольцевую диафрагму 2, отражаются зеркалом М1 (3) и направляются на входное окно тороидального электростатического анализатора (5). Зеркало М1 имеет выпукло-вогнутую форму и обеспечивает возможность регистрации частиц, пришедших в прибор с полярных углов вплоть до 90°, выполняя "свертку" частиц по полярному углу.

Тороидальный электростатический анализатор служит для выделения узкого энергетического диапазона энергии заряженных частиц. Его внутренняя обкладка заземлена, а на внешнюю обкладку подается потенциал, отклоняющий заряженные частицы. Те частицы, чья энергия соответствует поданному потенциалу для заданной формы анализатора, проходят его и попадают на зеркало M2 (6). M2 имеет коническую форму и разворачивает траектории частиц на координатно-чувствительный детектор. Зная координаты прихода частицы на детектор, можно определить направление, с которого пришла частица на вход прибора [10].

Для регистрации частиц в приборе используется координатночувствительный детектор на основе микроканальных пластин с анодом типа клинья-полосы. Конфигурация детектора и анода приведены на рисунке 12. Анод состоит из электродов, имеющих форму клиньев, полос и полос с вырезанным клином, которые объединены в три группы: A, B и C. Ширина полос линейно изменяется с изменением координат X и Y. Отношение зарядов, регистрируемых в этих цепях, позволяет определить координату «центра тяжести» заряда. Таким образом, координаты прихода частицы на детектор определяются формулой: X = A/(A + B + C), Y = B/(A + B + C), где A, B и C – соответствующие сегменты анода [60].



Рисунок 12. Структура координатно-чувствительного детектора прибора АРИЕС-Л и анода, используемого в детекторе. 1 – шевронная сборка из трех микроканальных пластин; 2 – анод; 3 – электронные платы с зарядочувствительными элементами. А, В и С – сегменты анода.

Для определения массового состава потока частиц используется времяпролетная схема прибора. Для этого используется затвор 4 (рисунок 10), расположенный за зеркалом М1. Затвор представляет собой комбинацию параллельных электродов, на которые подается потенциал разной полярности [74]. Когда затвор закрыт (на его электроды подаются разнополярные потенциалы), частицы, вышедшие из зеркала M1, под действием образованного затвором электрического поля отклоняются и не попадают в электростатический анализатор. В случае, если потенциал на затвор не подается, частицы проходят через электронно-оптический тракт прибора и регистрируются детектором. Для каждой частицы записывается время пролета, отсчитываемое с момента закрытия затвора. По времени пролета частиц можно сделать вывод об их массе. Затвор открывается на короткий промежуток времени, впуская во времяпролетную схему порцию частиц, обеспечивая различный приход ионов на детектор в зависимости от их отношения массы к заряду. Осциллограмма, демонстрирующая изменение потенциала на электродах затвора, приведена на рисунке 13.



Рисунок 13. Изменение потенциала на электродах затвора при работе прибора в режиме регистрации массового спектра. Ступенчатое изменение потенциала позволяет ионам пройти через затвор.

Принцип действия конвертера нейтральных частиц основан на ионизации нейтральных атомов при их взаимодействии с поверхностью

электрода-ионизатора [56]. Структура конвертера показана на рисунке 14. Входное окно конвертера нейтралов оснащено запирающей сеткой 1, предотвращающей попадание заряженных частиц внутрь конвертера. Ионы, образованные в результате взаимодействия с электродом-ионизатором 2, вытягиваются в сторону выходного окна 4, после чего попадают на входное окно модуля электронной оптики и регистрируются прибором. Для повышения эффективности ионизации нейтралов применено золотое покрытие электрода-анализатора [85].



Рисунок 14. Структура конвертера нейтральных частиц. 1 – входное окно с системой сеток, не пропускающих ионы; 2 – электрод-ионизатор; 3 – корректирующий электрод; 4 – выходное окно.

2.3 Моделирование работы электронно-оптической схемы прибора АРИЕС-Л

Первые проверки функционирования изготовленных модулей электронной оптики прибора АРИЕС-Л показали значительное расхождение изображения на МКП-детекторе с расчетными данными. Наблюдалась значительная асимметрия изображения, кроме того, поля зрения прибора вместо расчетных 0°—90° по полярному углу составляли 0°—40°. Для определения причин столь значительного расхождения параметров реального прибора и электронной модели были проведены работы по приведению

компьютерной модели приора в соответствие с конструкторской моделью. Доработанная компьютерная модель прибора учитывала большинство конструктивных особенностей изготовленного прибора. На рисунке 15 приведено сравнение начальной компьютерной модели прибора и переработанной компьютерной модели, использовавшейся для анализа особенностей работы изготовленных образцов МЭО, а также поиска причин имеющихся дефектов изображений.



Рисунок 15. Сравнение компьютерных моделей МЭО. Слева – начальная модель, использовавшаяся при создании прибора. Справа – переработанная модель, учитывающая конструктивные особенности прибора.

Предварительный анализ переработанной модели позволил обнаружить частичное затенение траекторий движения частиц элементом конструкции прибора. Экранирующий стакан в своем начальном варианте перекрывал траектории для частиц, пришедших в прибор с полярных углов выше 45 градусов. Данный элемент конструкции был заменен с учетом результатов проведенного моделирования.

2.4 Моделирование дефектов оптики

Выполненная доработка экранирующего стакана позволила незначительно улучшить поля зрения прибора, однако они по-прежнему значительно отличались от расчетных. С целью определения причин несоответствия полей зрения компьютерной модели и изготовленного
прибора было проведено моделирование различных дефектов элементов электронной оптики. Моделировалось влияние на изображение частиц на МКП-детекторе вертикальные и горизонтальные перемещения электродов зеркал М1 и М2, наклон зеркал М1 и М2, вертикальные и горизонтальные перемещения внешней обкладки электростатического анализатора.

Моделирование перемещения зеркала М1

Конструкцией прибора предусмотрена возможность перемещение зеркала М1 в пределах ±0,5 мм относительно нулевого положения. Моделирование работы оптики с зеркалом М1, установленным в крайних положениях и последующие эксперименты показали, что положение М1 не оказывает существенного влияния на изображение на МКП-детекторе, оказывая влияние в большей степени на эффективность регистрации заряженных частиц. Зависимости координат прихода частиц на детекторе от положения зеркала М1 для полярных углов 0, 45 и 90 градусов приведены на рисунке 16.



Рисунок 16. Изменение координаты частиц на МКП-детекторе при перемещении зеркала М1

Моделирование перемещения зеркала М2

Проведенное моделирование перемещения зеркала M2 показало, что существенное влияние на изображение оказывается при его смещении относительно нулевого положения более чем на 3 мм, что невозможно в рамках используемой конструкции. Таким образом, было установлено, что неточности позиционирования M1 или M2 при сборке MЭO не могли привести к существенным искажениям изображения на МКП-детекторе.

Моделирование перемещения внешней обкладки электростатического анализатора

В приборе используется торовый электростатический анализатор, внутренняя обкладка которого заземлена, а к внешней прикладывается потенциал. Проводилось моделирование двух типов сдвигов внешней обкладки ЭСА относительно внутренней: горизонтальный и вертикальный.

Моделирование показало, что горизонтальное перемещение не оказывает существенного влияния на поля зрения, но приводит к смещению центра симметрии изображения на детекторе.

Моделирование вертикального перемещения внешней обкладки ЭСА показало, что изменение ее положения оказывает значительное влияние на траектории движения частиц внутри ЭСА и на поля зрения прибора. Согласно расчётам, при смещении внешней обкладки ЭСА в сторону МКПдетектора на 0.1 мм, через ЭСА не проходят частицы с полярным углом входа в прибор больше 75 градусов, наблюдается сильное смещение изображения к краю детектора. При увеличении смещения обкладки ЭСА, изображение все больше сдвигается к краям детектора, уменьшается поле зрения прибора по полярному углу. Результаты моделирования перемещения внешней обкладки ЭСА приведены в таблице 3.

38

Полярный угол,	0	15	30	45	60	75	
градусы							
смещение ЭСА, мм	Расстояния от центра детектора до центра						
	изображения, мм						
-0.1	5.5	8.4	11.7	14.3	16.5	18.4	
-0.15	6.8	9.9	13.6	16.4	18.4		
-0.2	8.8	12	15.5	18.1			

Таблица 3. Влияние перемещения обкладки ЭСА на поля зрения прибора

На основании проведенных исследований был сделан вывод, что для достижения требуемых полей зрения прибора необходимо поднять внешнюю обкладку ЭСА. Для этого были изготовлены калибровочные шайбы и осуществлена переборка ЭСА. Пример изменения координаты пятна ионов на МКП-детекторе при подъеме обкладки на 0.1 мм приведен на рисунке 17.



Рисунок 17. Влияние перемещения внешней обкладки ЭСА на 0.1 мм. Видно, что подъем обкладки ЭСА обеспечил сдвиг изображения регистрируемых ионов ближе к центру детектора.

Выполненная операция позволила увеличить поля зрения с 0-45 градусов по полярному углу до 0-88 градусов для КДО АРИЕС-Л и 0-80 градусов для ШО АРИЕС-Л.

2.5 Функциональные испытания прибора АРИЕС-Л

Для подтверждения основных аналитических характеристик перед началом приемосдаточных испытаний для КДО и ШО прибора АРИЕС-Л были проведены функциональные испытания, включавшие в себя:

 определение относительного пропускания модуля электронной оптики прибора для набора азимутальных и полярных углов;

- проверку полей зрения прибора;

- проверку углового разрешения по азимутальным и полярным углам;

 проверку энергетического диапазона и энергетического разрешения для выбранных полярных и азимутальных углов – ΔE/E;

проверку массового разрешения М/ΔМ для выбранных азимутальных и полярных углов;

- проверку работы конвертера нейтральных частиц.

Определение относительного пропускания

Относительное пропускание прибора – зависимость скорости счета детектора прибора ОТ полярного И азимутального углов. Данная характеристика позволяет сделать выводы о чувствительности прибора при регистрации частиц, попавших во входное окно с разных углов. Определение относительного пропускания проводилось на четырех азимутальных углах (0°, 90°, 180°, 270°) для диапазона полярных углов от 0° до 90° с шагом 10°. Проверка проводилась на моноэнергетическом мононаправленном пучке 1 кэВ. Результаты измерений ионов при энергии относительного пропускания приведены ШО АРИЕС-Л на рисунке 18.



Рисунок 18. Относительное пропускание модуля электронной оптики прибора АРИЕС-Л для четырех азимутальных углов. Точность в определении скорости счета не хуже 3% и обусловлена стабильностью источника ионов.

Приведенные данные получены для одинаковой плотности потока ионов для всех положений прибора. Наблюдаемые различия в пропускании МЭО на различных азимутальных углах связаны с некоторой асимметрией расположения его элементов друг относительно друга, связанной с изготовлении деталей. Падение эффективности погрешностями при регистрации частиц В зависимости OT полярного угла связано С особенностями конструкции МЭО и согласуются с компьютерной моделью прибора. Различия в характеристиках прибора на разных углах будут учтены при обработке получаемой научной информации.

Проверка полей зрения прибора

Для решения поставленных в рамках проекта "Луна-25" научных задач модулю электронной оптики прибора необходимо иметь пропускание по полярному углу от 0° до 60°. Это связано с затенением поля зрения прибора элементами конструкции космического аппарата. Проверка полей зрения была выполнена для набора азимутальных углов от 0° до 350° с шагом 10° и

для полярных углов от 0° до 90° с шагом 10°. Результаты проверки приведены на рисунке 19. Испытываемый образец обеспечивает регистрацию частиц в диапазоне полярных углов от 0° до 80°, что удовлетворяет требованиям к полям зрения и позволяет решать поставленные научные задачи.



Рисунок 19. Распределения потоков частиц на координатно-чувствительном детекторе ШО прибора АРИЕС-Л при выполнении проверки полей зрения прибора и соответствуют. облучению прибора с фиксированного указанного полярного угла, и сумме 36 азимутальных углов с шагом 10°.

Определение разрешения по полярному углу

Согласно техническим требованиям угловое разрешение прибора по полярному углу должно быть не хуже 30°. Определение разрешения по полярному углу производилось для четырех азимутов (север, восток, юг, запад) на основе анализа пространственного распределения полного числа событий, зарегистрированных детектором прибора на каждом полярном угле. Пример определения разрешения при сравнении изображений, полученных на полярных углах 10° и 40°, приведен на рисунке 20. Наверху рисунка показаны изображения потоков ионов на детекторе прибора, снизу – профили этих изображений. Проведенные испытания показали, что разрешение штатного образца прибора по полярному углу для каждого азимута не хуже 30°, что соответствует предъявляемым требованиям.



Рисунок 20. Измерения, использованные для определения разрешения МЭО.

Определение разрешения по азимутальному углу

Согласно техническим требованиям угловое разрешение прибора по азимутальному углу должно быть не хуже 40°. Определение величины азимутального углового разрешения проводилось для набора азимутальных углов: 20°, 340°, 150°, 190°, 70°, 110°, 300°, 260° при значении полярного угла 40°. Примеры изображений приведены на рисунке 21. Наверху рисунка показаны изображения потоков ионов на детекторе прибора, снизу – профили этих изображений. Анализ пространственных распределений частиц на детекторе прибора показал, что разрешение по азимутальному углу для 40°, МЭО испытываемого образца не хуже что удовлетворяет предъявляемым требованиям.



Рисунок 21. Измерения, использованные для определения разрешения по азимутальному углу по изображениям на детекторе.

Определение разрешения по энергии ДЕ/Е

Проверка $\Delta E/E$ проводилась на каждом азимуте для набора полярных углов от 0° до 80° с шагом 10°. Расчет величины $\Delta E/E$ проводился по полной ширине на полувысоте зависимости скорости счета детектора от энергии потока ионов. Проведенные испытания показали, что для испытываемого образца прибора величина $\Delta E/E$ не превышает 14%, что соответствует предъявляемым к прибору техническим требованиям. Результаты измерений $\Delta E/E$ приведены на рисунке 22.



Рисунок 22 Зависимость величины $\Delta E/E$ от полярного угла для четырех азимутов. Точность в определении $\Delta E/E$ не хуже 3%.

Определение массового разрешения

Определение массового разрешения проводилось для четырех азимутальных углов (север, восток, юг, запад) для набора полярных углов от 10° до 80° при энергии ионов 1 кэВ. Работы велись с напуском аргона (40 а.е.м.) в источник ионов. Выводы о массовом разрешении делались для каждого положения прибора по полной ширине на полувысоте массового пика аргона. Пример времяпролетного спектра для энергии 1 кэВ при напуске азота приведен на рисунке 23.



Рисунок 23. Пример времяпролетного спектра для частиц с энергией 1кэВ, северный азимут.

Согласно требованиям к прибору, величина М/ΔМ должна быть не менее 15 для массового пика аргона при энергии 1 кэВ. Результаты испытаний показывают, что массовое разрешение прибора значительно превышает требуемое значение и для КДО составляет от 30 до 79 в зависимости от полярного и азимутального углов прибора (рисунок 24).



Рисунок 24. Зависимость $M/\Delta M$ от полярного угла для четырех азимутов при энергии 1 кэВ. Точность при определении $M/\Delta M$ не хуже 4%.

Проверка работоспособности прибора в заданном диапазоне энергий

Согласно техническим требованиям прибор должен обеспечивать регистрацию заряженных частиц в диапазоне энергий от 150 до 4500 эВ. Проверка работоспособности прибора в заданном энергетическом диапазоне проводилась для четырех азимутальных углов (север, восток, юг, запад) на полярном угле 45°. С целью получения более подробной информации о прибора проверка возможностях проводилась В расширенном энергетическом диапазоне – от 30 до 5000 эВ. Нижний предел энергий обусловлен ограничениями, связанными с параметрами работы ионного источника. Лабораторные тесты показывают, что прибор обеспечивает нижний порог энергии регистрируемых частиц 10 эВ. Верхний предел связан с используемыми в приборе высоковольтными источниками питания и механическими особенностями модуля электронной оптики. Проверка показала нормальное функционирование прибора в заданном энергетическом диапазоне. Для проведения данной проверки сначала устанавливалось требуемое значение энергии ионов, затем осуществлялось сканирование этого потока прибором. Примеры полученных испытываемым энергетических спектров приведены на рисунке 25.



Рисунок 25. Регистрация потоков заряженных частиц при работе прибора в режиме регистрации энергетического спектра.

Проверка функционирования конвертера нейтральных частиц

При проверке конвертера нейтральных частиц испытываемый прибор размещался таким образом, чтобы кроме регистрации нейтральных атомов было возможно и детектирование потока первичных ионов из ионного источника и ионов, рассеянных на стенках вакуумной камеры. Схема размещения прибора в вакуумной камере приведена на рисунке 26.



Рисунок 26. Размещение прибора в АРИЕС-Л РМ для проверки функционирования конвертера нейтральных частиц.

В процессе проверки режим работы источника нейтралов фиксировался ионный ток на пластине-нейтрализаторе и скорость счета детектора прибора, что позволило оценить эффективность регистрации нейтральных частиц прибором (отношение скорости счета частиц детектором к потоку нейтральных частиц на входе в прибор). Эффективность регистрации нейтральных частиц прибором для КДО составила ~3·10⁻⁷, для ШО ~2·10⁻⁶. Примеры распределений потока ионов из конвертера нейтральных частиц, зарегистрированных прибором, приведены на рисунке 27.



Рисунок 27. Распределения потоков частиц на детекторе, полученные при работе с конвертером нейтральных частиц: **a** – одновременная регистрация первичных частиц из источника ионов и нейтралов из конвертера нейтральных частиц, **б** – регистрация потока нейтральных атомов без мониторинга первичного ионного потока.

КДО и ШО прибора АРИЕС-Л прошли полный объем проверок, предусмотренный программой функциональных испытаний. Сравнение результатов испытаний двух образцов прибора приведено в Приложении 1. Сравнение фактических значений проверяемых параметров с требованиями функциональных испытаний [A5] и результатами аналогичных испытаний предшественников прибора – анализаторов ДИ [78] и РІСАМ [33] приведено в таблице 4.

Проверяемый	Требуемое	КДО	ШО	ДИ	PICAM
параметр	значение				
Поле зрения по	0-60	0-88	0-80	0-80	0-65
полярному углу,					
град.					
Разрешение по	Не хуже 30	30	30	7.5*	30
полярному углу,					
град.					
Разрешение по	Не хуже 60	40	40	30*	60
азимутальному					
углу, град.					
Энергетическое	Не хуже 15%	От 2% до 14%	От 3% до 13%	От 7% до 13%	20%
разрешение, $\Delta E/E$					
Разрешение по	Не менее 15 для	> 30	> 30	~25	50
массе, $M/\Delta M$	40 а.е.м. (на				
	энергии1кэВ)				
Энергетический	150 - 4500 эВ	30 – 5000 эВ	10 – 5000 эВ	3 – 3000 эВ	~100 – 3000 эВ
диапазон					
Регистрация	Да	Да	Да,	нет	нет
нейтральных		эффективность	эффективность		
частиц		~3.10-7	~2.10-6		

* Оценка на основе компьютерного моделирования

2.6 Определение аналитических характеристик штатного образца прибора АРИЕС-Л

Калибровка высоковольтного источника питания прибора

Для обеспечения точного определения энергии регистрируемых частиц была выполнена калибровка высоковольтного источника, отвечающего за подачу потенциала на зеркала М1, М2 и электростатический анализатор. Калибровки производились с использованием высоковольтного делителя ЕМСО и мультиметра NI PXIe-4065. В процессе калибровок было установлено соответствие между задаваемым потенциалом, измеряемым внешним мультиметром потенциалом и показаниями внутреннего измерителя напряжения. Зависимость между установленным и измеренным значениями потенциалов приведены на рисунке 28.



Рисунок 28. Зависимость между заданным потенциалом и его измеренными значениями. Черным показано напряжение, измеренное внешним мультиметром, красным и синим – измерения внутренними АЦП прибора. Точность измерений внешним мультиметром составляет 20 мВ.

Разница между задаваемым потенциалом и измеряемым внешним мультиметром потенциалом приведена на рисунке 28. Полученная кривая используется для определения регистрируемой энергии заряженных частиц.



Рисунок 29. Разница между задаваемым и измеряемым потенциалами.

Разница между выдаваемым и измеряемым потенциалом не превышает 5 В, что не оказывает существенного влияния на точность измерений прибора, особенно в области высоких энергий. Приведенная на рисунке 28 кривая будет использована для интерпретации получаемых прибором научных данных.

Проверка качества пропускания оптики

Проверка качества пропускания выполнялась при различных положениях прибора с шагом 10 градусов по азимутальному углу и 1 градус по полярному. В каждом положении прибора выполнялось накопление частиц в течении 5 секунд. Измерения проводились для стабилизировавшегося потока ионов с энергией 1 кэВ. Результаты проверки приведены на рисунке 30. Проверка показала, что конвертер нейтральных частиц, расположенный в восточном азимуте дает затенение при регистрации заряженных частиц начиная с 30 градусов и выше.

Аналогичная проверка, только для меньшего диапазона углов выполнялась на этапе ФИ. Проведение детальной проверки позволило

выявить ряд особенностей МЭО КДО. Из полученной зависимости видно, что прибор имеет наибольшую эффективность регистрации для полярных углов, близких к зениту.



Азимутальный угол

Рисунок 30. Приводится зависимость накопления частиц за время экспозиции 5 секунд от полярных координат прибора.

Структура в виде колец, которую видно на рисунке 29, вызвана затенением потока частиц кольцами электростатического затвора времяпролетной схемы прибора.

Определение энергетического разрешения прибора

Определение энергетического разрешения ∆Е/Е проводилось для набора полярных и азимутальных углов с шагом 10 градусов для азимутального угла и 2 градуса для полярного. Проверка проводилась при фиксированном потенциале на оптике 1 кэВ. При этом для каждого положения прибора регистрировался скорость счета детектора прибора в зависимости от энергии ионов, испускаемых ионным источником. Энергия ионов изменялась в

диапазоне 1000 ± 100 эВ с шагом 10 эВ. Расчет величины $\Delta E/E$ проводился по полной ширине на полувысоте зависимости скорости счета детектора от энергии потока ионов. Результат проверки энергетического разрешения прибора приведен на рисунке 31.



Рисунок 31. Зависимость энергетического разрешения ΔЕ/Е от полярного и азимутального углов.

Полученные зависимости качества пропускания оптики и ΔΕ/Е будут использованы для расчета геометрического фактора прибора [28] и восстановления функции распределения частиц, регистрируемых прибором в ходе космического эксперимента.

Проверка массового разрешения прибора

Проверка массового разрешения проводилась для набора полярных углов от 10 до 80 градусов с шагом 10 градусов и азимутальных углов от 0 до 350 также с шагом 10 градусов. Проверка проводилась на потоке ионов с энергией 500 эВ с напуском аргона в ионный источник. По получаемым на каждом угле массовым спектрам проводилось определение массового разрешения для заданного положения прибора. Соотношение М/ΔМ рассчитывалось для массового пика аргона (40 а.е.м.) по полной ширине на полувысоте. На основании полученных данных была построена зависимость массового разрешения прибора, приведенная на рисунке 32.



Рисунок 32. Зависимость M/ Δ M от угла прихода частиц.

Поскольку В приборе применяется времяпролетная система определения массового состава ионов С запиранием частиц электростатическим затвором, разрешение прибора зависит как от времени открытия затвора, так и от энергии регистрируемых частиц. Время открытия электростатического затвора задается внешней командой и составляет от 10 до 1250 нс. Варьируя скважность работы электростатического затвора можно добиться хорошего массового разрешения прибора с низкой чувствительностью, либо высокой чувствительности с низким массовым разрешением. Для четырех азимутальных углов (Север, Юг, Восток, Запад) была проверена зависимость массового разрешения от энергии частиц. Результат проверки приведен на рисунке 33. Приведенная зависимость получена для времени открытия затвора 15 нс.



Рисунок 33. Зависимость массового разрешения прибора от энергии частиц при времени открытия электростатического затвора 15 нс для четырех азимутальных углов. Ошибка в определении значения М/ΔМ не превышает 4% и обусловлена разрешением электростатического анализатора прибора ΔЕ/Е, которое для штатного образца прибора находится в пределах от 3% до 13%.

2.7 Работа прибора в составе космического аппарата

Работа прибора в составе космического аппарата осуществляется по составляемой заранее циклограмме. Прибор имеет два режима работы – дежурный режим и режим измерений.

Дежурный режим – начальный режим работы прибора, в который прибор переходит либо после коммутации питания, либо после завершения работы в режиме измерений.

Режим измерений включает в себя три подрежима: регистрацию энергетического спектра ионов, регистрацию массового состава ионов и детектирование потока нейтральных атомов.

Работа прибора в режиме измерений осуществляется в соответствии с рабочими таблицами, хранящимися в памяти прибора. Память прибора позволяет хранить до 256 таблиц. Таблицы состоят из 64 ступенек, каждая ступенька задает параметры работы электронной оптики прибора: потенциалы на МЭО, конвертере, электродах электростатического затвора и скважность его работы.

Вызов таблицы осуществляется внешней командой. При этом задаются следующие параметры работы прибора с заданной таблицей: начальный номер ступеньки, время нахождения на каждой ступеньке, число проходов выбранной таблицы.

На этапе лабораторных калибровок разработаны и загружены в прибор 255 рабочих таблиц, отвечающих за работу прибора при регистрации энергетического и массового спектров заряженных частиц и детектирования потока нейтральных атомов. Таблицы включают в себя как линейное, так и логарифмическое изменение потенциала на элементах электронной оптики прибора.

Таблицы разделены на два типа – 32- и 64- разрядные. В случае 32разрядных таблиц, исследуемый энергетический диапазон делится на 32 ступени, при этом значение напряжения растет до середины таблицы, затем убывает, возрастание и спад напряжения симметричны. Работа по 32разрядным таблицам обеспечивает двойной проход одного и того же диапазона энергий.

В случае 64-х разрядных таблиц энергетический диапазон делится на 64 ступеньки и полученные значения потенциалов записываются таким образом,

⁵⁶

что до 32 ступеньки напряжение растет, а с 33 по 64 – убывает. Использование 64-разрядных таблиц позволяет осуществлять подробное сканирование потока частиц по энергиям.

Примеры изменения напряжения на элементах МЭО прибора при работе с логарифмическими и линейными таблицами приведены на рисунке 34.



Рисунок 34. Пример изменения потенциала на элементах МЭО при работе с 32-х разрядными таблицами.

На рисунке 34 приводится покрытие энергетического диапазона прибора 32-х разрядными таблицами. Таблицы из групп А и В линейные, минимальный потенциал на оптике 10 В для группы А и 100 В для группы В. Таблицы из групп С, D, Е – логарифмические, минимальный потенциал на оптике для группы С составляет 10 В, D – 30 В, Е – 100 В. Таблицы из групп F, J и H обеспечивают работу прибора с конвертером нейтральных атомов. При этом в таблицы из группы F обеспечивают подачу фиксированного потенциала на элементы МЭО и КН, а таблицы из групп J и H позволяют осуществлять одновременную регистрацию как потока нейтральных атомов, так и энергетического спектра заряженных частиц в диапазоне энергий до 1500 эВ.



Рисунок 35. Покрытие энергетического диапазона 32-разрядными таблицами. Приведенные на рисунке 35 таблицы записаны в память прибора тремя группами, отличающимися временем открытия электростатического затвора при работе в режиме регистрации массового спектра. В первой группе время

открытия затвора зависит от регистрируемой энергии и варьируется в диапазоне от 30 до 100 нс, что обеспечивает регистрацию массового спектра с разрешением $\Delta M/M \ge 20$. Вторая группа таблиц имеет фиксированное значение времени открытия затвора 15 нс и обеспечивает максимальное разрешение прибора в режиме регистрации массового спектра ∆M/M≥30. Третья группа также имеет фиксированное время открытия затвора 120 нс и обеспечивает регистрацию массового спектра С низким массовым разрешением, однако с более высокой по сравнению с другими таблицами чувствительностью. Работа по таблицам ИЗ третьей группы предусматривается в условиях низкой интенсивности потоков заряженных частиц.

Также в памяти прибора содержатся 64-х разрядные таблицы, перекрывающие полный энергетический диапазон прибора. График покрытия энергетического диапазона для линейных и логарифмических 64-х разрядных таблиц приведен на рисунке 36.



Рисунок 36. Покрытие энергетического диапазона 64-х разрядными таблицами. Энергетический диапазон одинаков как для линейных, так и логарифмических 64-х разрядных таблиц.

Разработанные таблицы перекрывают весь энергетический диапазон прибора. Комбинирование в циклограмме работ прибора по различным таблицам позволяет решать задачи регистрации вторичных частиц с поверхности реголита и обеспечивать мониторинг ионов солнечного ветра.

2.8 Проверка функционирования прибора по циклограмме в лабораторных условиях

В процессе проведения лабораторных отработок ШО АРИЕС-Л были разработаны циклограммы работы прибора, предназначенные для исполнения после посадки космического аппарата, выполнены проверки функционирования прибора с их применением. Каждая циклограмма имеет длительность ~1.5 часа и сочетает в себе комбинацию из различных режимов работы. При этом проверяется работа прибора с различными скоростями сканирования энергетического и массового спектров, тестируется работа времяпролетной схемы прибора с различным массовым разрешением, работа конвертера нейтральных проверяется атомов. Полученные В результате исполнения этих циклограмм данные позволят получить информацию об условиях работы прибора и сформировать программу последующих измерений на поверхности Луны.

В условиях космического эксперимента прибор планируется включать на 1.5 часа в режиме измерений, после чего снимать с него питания на 2 часа. Такая скважность работы выбрана исходя из двух факторов: среднее потребление прибора за сутки не должно превышать 3 Вт; снятие питания с прибора в промежутках между циклами измерений позволит обеспечить более эффективное охлаждение прибора и не допустить перегрева его отдельных узлов.

В режиме измерений потребление прибора находится в диапазоне от 4.5 до 7 Вт и зависит от скорости сканирования по энергетическому спектру, скважности работы затвора времяпролетной схемы, подачи питания на обкладки конвертера нейтральных частиц. В процессе измерений планируется комбинировать работу прибора в режиме регистрации энергетического и массового спектров.

Каждая циклограмма включает в себя следующие процедуры: плавный вывод детектора на рабочий режим, чередование циклов измерений энергетических и массовых спектров и снятие потенциала с детектора и оптики по завершению измерений. Кроме того, между циклами измерений предусмотрена выдача команды для корректировки потенциала на МКПдетекторе. Это сделано для того, чтобы восстановить работу прибора в случае его отключения при превышении максимально допустимой прибора. Вывод детектора рабочий температуры узлов на режим представляет собой плавное увеличение потенциала на детекторе с шагом 50 В за 2 секунды. Для ШО АРИЕС-Л рабочий потенциал детектора на момент проведения настроек и калибровок составляет 2500 В.

Циклограммы работ прибора на первые 24 часа измерений составлена таким образом, чтобы с каждым включением прибора осуществлять регистрацию частиц в более широком диапазоне энергий. После посадки вокруг космического аппарата может содержаться большое количество пылевых частиц, поднятых с поверхности в результате работы двигателей. Кроме того, сам КА может быть недостаточно обезгажен. Постепенное расширение диапазона регистрируемых энергий позволит обезопасить прибор от короткого замыкания в модуле электронной оптики, дав время на дополнительную дегазацию КА и оседание пыли. Кроме того, в случае возникновения короткого замыкания можно будет точно определить безопасный рабочий энергетический диапазон. Описание циклограмм работы прибора ДЛЯ первых 24 часов измерений и результаты проверки функционирования прибора приведены в Приложении 2. При проверке работы по циклограммам также фиксировалось среднее потребление прибора. Эта информация будет использована при формировании плана работ прибора в составе КА. Далее приводятся наиболее значимые циклограммы работы прибора.

61

Первое включение прибора в режиме измерений

Циклограмма первого включения прибора предназначена для проверки работоспособности его узлов после перелета и посадки и сочетает регистрацию энергетического и массового спектров в диапазоне энергий от 10 до 1500 эВ по линейным и логарифмическим таблицам с длительностью ступеньки 1 секунда. На рисунке 37 показан результат проверки работы прибора по циклограмме первого включения в лабораторных условиях.



Рисунок 37. Работа прибора по циклограмме первого включения после посадки КА. Циклограмма включает в себя проверку работы прибора по регистрации энергетического спектра в диапазоне 10-1500 эВ и регистрацию энерго-масс спектра в диапазоне 10-500 эВ.

Проверка регистрации нейтральных атомов при работе по циклограмме

Проверка работы прибора по циклограмме регистрации нейтральных частиц проводилось при конфигурации рабочего места, приведенным на рисунке 25. При этом обеспечивалось освещение прибора как потоком нейтральных атомов, так и отраженными от стенок вакуумной камеры ионов, что в целом соответствует ожидаемым условиям работы прибора на Луне. Испытания показали, что наибольшая эффективность регистрации 62 нейтральных атомов достигается при установке фиксированного потенциала на конвертере нейтралов. Это связано с тем, что конвертер нейтралов наиболее эффективно работает при потенциале на электродах более 300 В. Результаты проверки приведены на рисунке 38.



Рисунок 38. Результаты проверки работы прибора по циклограмме регистрации нейтральных атомов.

Определение быстродействия прибора

информации Для обеспечения получения достоверной об энергетическом составе регистрируемых частиц, прибор не регистрирует частицы, пришедшие на детектор во время переключения потенциала между соседними ступеньками таблицы. Время переключения задано программно и составляет 0.25 секунды. Экспериментально было установлено, что за этот промежуток времени переходные процессы заканчиваются. Также прибор имеет задержку между проходами по таблицам, равную 1 секунде. Лабораторные испытания показали возможность получения достоверной информации об энергетическом составе региструемых ИОНОВ при длительности ступеньки 0,125 секунды. Результат работы прибора при работе по циклограмме проверки скорости сканирования приведена на рисунке 39.



Рисунок 39. Циклограмма проверки скорости сканирования по энергетическому спектру. Изменение длительности энергетической ступеньки от 1 секунды до 0,125.

Проведенная проверка быстродействия прибора показала, что время регистрации полного энергетического спектра с составляет 12,5 секунд. Данный показатель может быть улучшен за счет уменьшения длительности ожидания между измерениями на энергетических ступеньках и исключения задержки между измерениями между рабочими таблицами.

Выводы главы 2

Прибор АРИЕС-Л – широкоугольный энерго-масс анализатор, разработанный в рамках космической миссии Луна-25. В ходе выполнения космического эксперимента прибор позволит провести элементный состав области реголита посадки методами вторичной ионной В массспектрометрии, исследовать процессы взаимодействия солнечного ветра с реголитом, провести измерения потоков нейтральных атомов.

Сочетая комбинацию электростатического времяпролетного И элементов электронной оптики, прибор позволяет проводить анализ заряженных частиц по соотношению энергии к заряду Е/Q и выполнять массовый анализ потока частиц в диапазоне энергий от 10 эВ до 5000 эВ. Отличительной особенностью прибора является возможность одномоментной регистрации частиц выбранной энергии в поле зрения, близком к 2π. Принцип действия конвертера нейтральных частиц основан на ионизации нейтральных атомов при их взаимодействии с поверхностью электрода-ионизатора.

Прибор АРИЕС-Л прошел полный цикл лабораторных отработок – от корректировки компьютерной модели и предварительных настроек модулей электронной оптики – до настроек и испытаний конструкторско-доводочного и штатного образцов.

Выполненные работы позволили достичь требуемых от прибора аналитических характеристик: обеспечить необходимые поля зрения, угловое, энергетическое и массовое разрешение. Была выработана методика настроек модулей электронной оптики, определены узлы прибора, требующие особенного внимания при сборке. Полученные наработки будут использованы при создании приборов аналогичной конструкции в будущих космических миссиях. Подробные данные о характеристиках ШО АРИЕС-Л будут использованы при интерпретации научной информации, поступающей с прибора в процессе выполнения космического эксперимента.

65

Глава 3. Аппаратно-программный комплекс для испытаний плазменных спектрометров

Глава написана с использованием материалов из работ автора А5, А6 и А7.

В рамках работ по созданию приборов для космических миссий был создан аппаратно-программный комплекс (АПК), предназначенный для проведения лабораторных испытаний, настроек и калибровок плазменных энерго-масс спектрометров. В состав АПК входят рабочие места для функциональных и термовакуумных испытаний проведения настроек, образов приборов. Рабочие места оборудованы системами безмасляной вакуумной источниками нейтральных откачки, ИОНОВ И атомов, лабораторными манипуляторами источниками питания, И многофункциональными системами сбора и обработки информации. Для автоматизированного управления рабочими местами разработано специальное программное обеспечение. Данный комплекс позволяет параметров подробную проверку выполнять ионных энерго-масс спектрометров с одномоментным широким полем зрения, что в значительной мере повышает достоверность научной информации, получаемой с этих приборов в ходе космического эксперимента. Использование комплекса также позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на исследования характеристик приборов

3.1 Рабочее место для функциональных испытаний образцов приборов АРИЕС-Л

В состав рабочего места для функциональных испытаний (РМ ФИ) камера с системой откачки, входят вакуумная источники ИОНОВ И нейтральных атомов, контроля ионов, лабораторные датчик потока высоковольтные и низковольтные источники питания, манипулятор для размещения образца прибора под потоком ионов; система сбора и обработки информации. Структура РМ ФИ приведена на рисунке 40.

66



Рисунок 40. Структура аппаратно-программного комплекса.

Разрабатываемые научные приборы предназначены для работы в условиях космического пространства и устанавливаются на негерметичных космических аппаратах. Кроме того, процесс настроек и калибровок необходимостью облучения приборов связан С приборов потоками заряженных частиц и подачей высоковольтных потенциалов на элементы электронно-оптических и детекторных узлов приборов, что невозможно осуществить при нормальном атмосферном давлении. Для проведения испытаний используется вакуумная камера цилиндрической формы с внутренним диаметром 600 мм и длиной 700 мм. Такие размеры обусловлены необходимостью размещения внутри вакуумной камеры манипулятора и средств контроля ионного потока. Для контроля уровня вакуума используется магниторазрадный датчик Pfeiffer PKR251. Рабочее давление в камере, пригодное для испытаний прибора и его узлов, составляет 10⁻⁵...10⁻⁶ Торр и ниже. Для достижения этого давления используется откачная система, состоящая из турбомолекулярного и безмасляного форвакуумного насосов. Выбор безмасляной откачной системы обусловлен использованием в составе приборов координатно-чувствительных детекторов на основе микроканальных пластин. Наличие паров масла в вакуумной камере может существенно снизить чувствительность таких детекторов, а в ряде случаев – привести к выходу из строя детекторного узла. Для контроля состава остаточного газа в вакуумной камере используется лабораторный квадрупольный масс-спектрометр Extorr XT100. Использование внешнего масс-спектрометра при настройке времяпролетных узлов приборов позволяет облегчить отождествление массовых пиков регистрируемых частиц.

Для размещения образцов прибора АРИЕС внутри вакуумной камеры используется манипулятор, позволяющий осуществлять вращение прибора под потоком ионов в двух плоскостях. Манипулятор представляет собой поворотный столик с посадочными местами для крепления прибора, качелях, обеспечивающих размещенный на наклон относительно Конструкция манипулятора вертикальной оси. осуществлять поворот прибора под ионным пучком на 360 градусов по азимутальному углу и наклон до 90 градусов по полярному углу. Точность задания положения прибора не хуже 0.5 градуса для каждого из углов, точность определения положения прибора – не хуже 0.1 градуса. Пример размещения прибора в вакуумной камере перед началом проведения функциональных испытаний показан на рисунке 41.

Манипулятор оснащен модулем электроники и предусматривает управление с компьютера. Использование манипулятора в составе РМ ФИ позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на проверки и настройки параметров прибора, требующие изменения ориентации прибора в пространстве.

68



Рисунок 41. Размещение образца прибора АРИЕС-Л на манипуляторе внутри вакуумной камере. 1 – датчик контроля потока ионов, 2 – образец прибора АРИЕС-Л, 3 – манипулятор.

Для облучения испытываемого прибора потоком заряженных частиц ионизацией используется ионный источник с электронным ударом. Конструкция источника ионов позволяет работать как на остаточном газе, так и с напуском рабочего газа, обеспечивая поток частиц с энергиями от 30 до 5000 эВ. Для контроля параметров работы источника ионов используется датчик контроля потока (ДКП), представляющий собой цилиндр Фарадея [13] с восьмисегментным анодом [11] и усилителями тока. Электроннооптическая схема ДКП и структура анода показаны на рисунке 42. ДКП позволяет регистрировать пространственное распределение пучка, плотность потока, энергетическое распределение в диапазоне энергий от 10 до 5000 эВ. Уровень регистрируемого ионного тока составляет 10⁻¹¹-10⁻⁹ А. Точность измерения ионного тока не хуже 2%. Разработка и изготовление ДКП велись совместно со специалистами СКБ КП ИКИ РАН.



Восьми-сегментный анод

Рисунок 42. Структура датчика контроля потока. 1 – входное окно ДКП.; 2 – двойная аналитическая сетка; 3 – супрессорная антиэлектронная сетка; 4 – восьмисегментный анод. Справа показана конфигурация коллекторов используемого в ДКП анода.

С использованием ДКП были проведены проверки энергетической ширины $\Delta E/E$ потока ионов (где ΔE – ширина распределения ионного пучка на полувысоте, E – энергия максимума интенсивности пучка) в полном диапазоне энергий и выполнена проверка стабильности ионного потока. Результаты этих проверок приведены на рисунке 43. Проведенные испытания показали, что ΔE потока ионов зависит от энергии. Для энергий ионов больше 700 эВ $\Delta E \leq 2\%$. Стабильность потока ионов после прогрева источника лучше 3%.



Рисунок 43. Пример определения $\Delta E/E$ и зависимость $\Delta E/E$ от энергии потока ионов.

Для проверок и настроек узла конвертера нейтральных атомов используется источник нейтральных частиц (ИН), представляющий собой систему отклоняющих и запирающих электродов и пластину-нейтрализатор [82]. Структура ИН приведена на рисунке 44.



Рисунок 44. Структура источника нейтральных частиц. 1 – входная диафрагма; 2 – электростатический дефлектор; 3 – пластина-нейтрализатор; 4 – запирающие электроды; 5 – выходная диафрагма. Линиями показаны траектории движения частиц в ИН.

Принцип действия источника нейтральных частиц основан на процессе нейтрализации ионов при взаимодействии с поверхностью мишенинейтрализатора [32]. Для получения потока нейтральных частиц ИН устанавливается перед источником ионов таким образом, чтобы поток заряженных частиц попадал во входное окно. Затем поток ионов отклоняется дефлектором и под острым углом попадает на поверхность мишенинейтрализатора. Отраженные и вторичные заряженные и нейтральные частицы, образованные в результате взаимодействия первичного потока ионов с мишенью-нейтрализатором, движутся в сторону запирающего электрода и выходного окна. Для получения на выходе ИН потока нейтральных атомов без примеси заряженных частиц на запирающие электроды может быть подан потенциал, что исключит прохождение заряженных частиц через диафрагму.

Материал пластины-нейтрализатора может быть выбран в зависимости задач эксперимента. Для работ с образцами прибора АРИЕС-Л, ОТ разрабатываемых в рамках миссии "Луна-25", использовались пластина шлифованного вольфрама и пластина с золотым покрытием. Конструкция ИН позволяет изменять угол падения ионов на пластину-нейтрализатор в диапазоне от 1° до 10° к плоскости пластины. В такой конфигурации ИН 9.10^{5} обеспечивает поток нейтральных атомов c плотностью до частиц/(см²·с).

Для мониторинга и управления составными частями PM ΦИ используется система сбора и обработки информации, собранная на основе шасси National Instruments PXI-1075 с контроллером NI PXI-8133. Использование системы сбора и обработки информации на базе РХІ создать автоматизированное рабочее место c позволяет широким функционалом и высокой степенью гибкости. Конфигурация оборудования и программного обеспечения может быть в короткие сроки адаптировано под проведение дополнительных испытаний.

Используемая в РМ ФИ система оснащена модулями DAQ PXI-6259 (многофункциональным модулем, содержащим многоканальные аналогоцифровые и цифроаналоговоые преобразователи, дискретные входы/выходы и счетчики), усилителем тока PXI-4022, цифровым мультиметром PXI-4065, платами интерфейсов RS-422 и RS-485. Для проведения дополнительных тестов система может дооснащаться генератором импульсов произвольной формы и быстрыми цифроаналоговыми преобразователями. Многофункциональный модуль DAQ PXI-6259 используется для работы с внешними высоковольтными источниками питания, для управления и сбора данных с датчика контроля потока ионов и при работах по настройкам детекторных модулей испытываемых приборов.

Усилитель тока РХІ-4022 в паре с мультиметром РХІ-4065 используется для контроля ионного тока при работе с конвертером нейтральных частиц для прогнозирования ожидаемого потока нейтральных

72
атомов и также может быть использован для мониторинга параметров работы ионного источника в тех случаях, когда ДКП не может быть применен. Отдельно мультиметр PXI-4065 используется при калибровках внутренних высоковольтных источников питания испытываемых образов приборов и для контроля потенциала на элементах электронной оптики приборов. Для взаимодействия с контроллерами вакуумного поста и источника ионов используются платы интерфейса RS-422. Для осуществления информационного обмена с испытываемым образцом прибора используется плата интерфейса RS-485.

Для обеспечения взаимодействия оператора с составными частями РМ ФИ и автоматизации набора проверок, выполняемых в процессе испытаний образцов разрабатываемых приборов, было разработано специальное программное обеспечение, интерфейс которого приведен на рисунке 45.



Рисунок 45. интерфейс программы управления аппаратно-программным комплексом.

В ручном режиме работы программное обеспечение позволяет задавать 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.

Автоматизированные режимы работы предусматривают проведение набора тестов для испытываемых образцов приборов без участия оператора. По результатам выполнения теста формируется текстовый файл, содержащий результаты проверки и параметры состояния рабочего места. В текущей конфигурации программное обеспечение предусматривает проведение трех автоматических тестов: проверку поля зрения прибора, подбор оптимальных потенциалов для электронной оптики испытываемого образца, проверку энергетического разрешения прибора для набора полярных и азимутальных углов. Ниже подробно описаны процедуры проведения автоматизированных порерок, выполняемых с помощью разработанного ПО.

Проверка полей зрения прибора

Проверка полей зрения прибора проводится для набора полярных и азимутальных углов при фиксированной энергии потока ионов. Для начала теста необходимо дождаться стабилизации потока ионов, либо ввести в пучок ионов коллектор для непрерывного контроля уровня ионного тока. Перед началом теста оператор задает диапазон сканирования по полярному и азимутальному углам и время экспозиции для каждого положения прибора. Затем программа выдает команду манипулятору установить начальное положение прибора в пространстве, после чего начинается последовательное изменение положений прибора по полярному и азимутальному углам. Минимальный допустимый шаг по обоим углам – 1 градус. Диапазон задания полярных углов – от 0 до 90 градусов, азимутальных – от 0 до 359. Для каждого положения прибора фиксируются такие параметры рабочего места,

как: уровень вакуума, положение манипулятора, настройки ионного источника, регистрируемый ионный ток, поток данных с прибора и количество частиц, зарегистрированных прибором в текущем положении.

Подбор оптимальных потенциалов для электронной оптики

Подбор потенциалов для электронной оптики испытываемых образцов приборов производится для достижения требуемых углов зрения и обеспечения выполнения требований по энергетическому разрешению, предъявляемых к разрабатываемым образцам. При этом для каждого положения прибора в пространстве подбирается оптимальное соотношение потенциалами, ИЗ между ДВУМЯ ОДИН которых прикладывается к электростатическим зеркалам прибора, второй к электроду электростатического анализатора. Подача потенциалов осуществляется с лабораторных высоковольтных источников питания. Подбор потенциалов выполняется для задаваемого оператором диапазона полярных И азимутальных углов при энергии ионного источника 1 кэВ. Для каждого положения прибора записываются параметры РМ ФИ, поток данных с прибора и скорость счета детектора прибора.

Проверка энергетического разрешения прибора

Энергетическое разрешение – одно из основных аналитических характеристик прибора. Проверка энергетического разрешения проводится для набора полярных и азимутальных углов при варьировании энергии источника ионов. Диапазон углов, ширина изменения энергии ионов, шаг изменения углов и энергий задаются оператором. В процессе проверки, после требуемого установки положения прибора под потоком ионов, осуществляется пошаговое изменение энергии ионного источника. При этом на каждой ступени фиксируются параметры работы РМ ФИ, поток данных с прибора и количество частиц, зарегистрированных прибором в текущем положении.

Описанная функциональность программного обеспечения позволяет значительно упростить процесс настройки элементов электронной оптики приборов и кардинально сократить время, затрачиваемое на определение их основных аналитических характеристик. Разработанное ПО обладает высокой степенью гибкости и позволяет в короткие сроки осуществить адаптацию для проведения работ с другими плазменными приборами и узлами электронной оптики [А6]. Описанный программный комплекс успешно применялся для настроек и проведения функциональных испытаний конструкторско-доводочного и штатного образцов плазменного энерго-масс спектрометра АРИЕС-Л, создаваемого в рамках проекта Луна-25 [А5].

3.2 Рабочее место для проведения термовакуумных испытаний образцов приборов

Одним из важных этапов наземной отработки космических приборов является проведение термовакуумных испытаний. В процессе проведения этих тестов проверяется функционирование КДО и ШО прибора в требуемом диапазоне температур в условиях вакуума, проводится термоциклирование прибора. Для проведения таких испытаний в ИКИ было создано рабочее место, включающее в себя вакуумную камеру со термостабилизируемой плитой. Структура рабочего места приведена на рисунке 46.

Для мониторинга за состоянием узлов рабочего места используется система сбора и обработки информации на базе шасси PXI-1085, оснащенным модулями источника питания 30В, модулем аналогового ввода для подключения резистивных термодатчиков, модулями интерфейсов RS-485 и RS-232, использующимися для обеспечения обмена данными с блоком управления откачной системы, блоком электроники ионного источника и испытываемым образцом прибора.



Рисунок 46. Структура рабочего места для проведения термовакуумных испытаний

Блок управления откачной системой предусматривает подключение четырех резистивных термодатчиков РТ-100, один из которых используется для контроля температуры термоплиты, а остальные три предназначены для испытываемого прибора. Для размещения на корпусе установки И поддержания требуемой температуры термоплиты используется жидкостной криотермостат LOIP-80. PM аттестовано для проведения термовакуумных испытаний в диапазоне температур от -70°С до +70°С. Термоплита является также частью манипулятора, позволяющего осуществлять вращение прибора вокруг вертикальной оси на 360°. РМ оснащено источником ионов, что позволило проверить работу прибора в крайних значениях температур на посадочных местах при облучении потоком заряженных частиц.

Для мониторинга за состоянием рабочего места и температурой узлов испытываемого прибора в процессе проведения термовакуумных испытаний было разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять контроль за основными параметрами рабочего места, управлять питанием прибора. Интерфейс программы показан на рисунке 47. Разработанное программное обеспечение также использовалось при проведении ресурсных испытаний КДО АРИЕС-Л.

Монипориня температурыхі	📴 Мониторинг температури. и
мониторинг параметры 5ТОР	мониторинг параметры
Мониторинг состояния термовакумного рабочего места термолала Элерэн Станка Солна Зарэн С Время эксперимента 00.00.39 Термоллига 24.4 0.1 27 24.8 0 24.8 0.1 27 Термозран 22-	СОМ-порт СОМ34 У СОМ34 У СОВСТАТОН, УАААА 1 Частота опроса 30 Период записи данных, с 15 Время термостабилизации, минуты 15 Время термостабилизации, минуты 16 ОССТАТОН, УАААА 17 ОССТАТОН, УАААА 17 ОССТАТОН, УАААА 18 ОССТАТОН, УАААА 18 ОССТАТОН, УАААА Рисс, Часка 18 ОССТАТОН, УАААА Рисс, Часка Рисс, Рисс, Рис
246 0 Далжение 21- 10041-0 10041-0 20- 140310 Источник питания прибора 34- 44- 44- 44- 44- 1045 0.45 5.97E-5 10010 20- 20- 20- 1000 10010 20- 20- 20- 1000 10010 20- 20- 20- 1000 10010 20- 20- 20- 20- 20- 20- 20- 20- 20- 20-	STATES Kawaya tongsaya Tahuayy Senia SettingsNumber of Byes at Senial Post Lest command Expend Time (s) Time has Dapied IEEAD_DATA S 2 44 IEEAD_DATA S

Рисунок 47. Интерфейс программы мониторинга для термовакуумной камеры: слева показан основное окно программы, справа – пользовательские настройки.

Функционал программы обеспечивает: мониторинг уровня вакуума в рабочем объеме термовакуумной камеры; считывание показаний с четырех резистивных термодатчиков РТ100; управление подачей напряжения питания на испытываемый прибор, мониторинг потребляемого тока; запись параметров рабочего места в лог-файл, учет времени работы установки. Пример визуализации лог-файла термоциклирования КДО прибора приведен на рисунке 48.

Запись данных в лог-файл производилась с частотой, задаваемой оператором рабочего места. Использование данной программы позволило значительно упростить работу с установкой в части управления и мониторинга за состоянием прибора, облегчило учет времени термоциклирования и наработки прибора.





3.3 Программный комплекс для работы со стендом нейтральных частиц

Одной из научных задач прибора АРИЕС-Л является регистрация нейтральных атомов, выбиваемых заряженными частицами с поверхности реголита. Для исследования процессов взаимодействия ионов и нейтральных атомов с поверхностями из различных материалов специалистами ИКИ РАН и НП АЭ было разработано лабораторное устройство - стенд нейтральных частиц. Конструкция устройства позволяет освещать исследуемую мишень как потоком заряженных частиц из источника ионов или электронов, так и потоком нейтральных атомов при условии установки дополнительного конвертера. Структура стенда нейтральных частиц показана на рисунке 49.

Устройство состоит из двух независимых поворотных плечей, на одном из которых размещается мишень с исследуемым образцом материала, на втором – детектор, оснащенный системой сеток, позволяющей проводить энергетический анализ заряженных частиц, выбиваемых с поверхности мишени. Для детектирования частиц используются ВЭУ-6. Схема включения детекторов позволяет регистрировать нейтральные атомы и либо положительные, либо отрицательные ионы. Прототипом прибора является лабораторная установка, созданная для исследования процессов рассеяния в университете Берна [81].

Возможность независимого поворота мишени и детектора позволяет изменять углы регистрации вторичных частиц или угол освещения мишени первичным пучком частиц без открытия вакуумной камеры, что значительно ускоряет процесс исследования.



Рисунок 49. Устройство стенда нейтральных частиц.

Задача автоматизации рабочего места со стендом нейтральных частиц заключалось в разработке программного обеспечения, включающего в себя органы управления отдельных приборов, входящих в состав РМ и

позволяющего проводить автоматические проверки углового и энергетического распределения вторичных частиц при различных положениях мишени. Структура рабочего места приведена на рисунке 50.



Рисунок 50. Структура рабочего места для проведения работ со стендом нейтральных частиц

Разработанное программное обеспечение состоит из нескольких модулей, отвечающих за взаимодействие с элементами рабочего места. Функционал ПО позволяет управлять лабораторными источниками питания и контролировать уровень выдаваемого потенциала, устанавливать требуемое положение в пространстве мишени и детектора стенда нейтральных частиц, измерять скорость счета детектора, управлять работой ионного источника и контролировать ионный ток на мишени, осуществлять управление работой системой вакуумной откачки, производить мониторинг уровня вакуума в основном объеме и на линии форвакуумной откачки. Интерфейс ПО приведен на рисунке 51.

Управление источниками питания нгол астения Спения	Состояние программы Сканирование по энергиям и запись в файл род Установка положения плечей стенда пос Автоматическое сканирование по угам и энергиям пос Измерить одиночный спектр <u>меасиве</u>	Положение детекторов Стенда Нейтралов Зеркало	Блок откачки Откачка Напуск Вакуметр камера Вакуметр откачка Установить U нат. Установить U нат. 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Настройки и состояние измерений "чисто измерений "чисто измерений " " " " " " " " " " " " " " " " " " "	Счетчик событий Счетчик событий Ф Сорсе счетчика Сорсе счетика Сорсе сч	Перебег зеркала Недобег ОУ Чедобег зеркала Недобег ОУ Установить углы <u>str_ANGLE</u> Задание параметров проверки углов	Автоподдержание Р
Регистрация ионного тока 422.Configuentian © Current Any 10xA Solutions 6611- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56613- 56614-	немар инграния 0 0 0 123 123 л	Начальный угол зеркала Конечный угол зеркала Приращение угла зеркала Число положений зеркала номер положения зеркала о Висло положения зеркала номер положения зеркала Самс Самссе 500	Катод. В Ц кат. 1 U кат. 2 Ток, А 2 Катод. В () 0 0 0 0 0 Анод. В () 0 0 0 0 0 Рефлектор. В () 0 0 8 0 А Экстрактор. В () 0 8 0 А Эмиссия, мА () 0 11, мкА 0 миссия, мА () 0 12, мкА 0 миссия, мА () 0 3, 8 0 А Т блока, С 0 Вакуум норм

Рисунок 51. Интерфейс программного обеспечения для автоматизированного управления стендом нейтральных частиц. ПО обеспечивает управление составляющими частями PM, сканирование по двум углам, сканирование по энергиям на измерительном плече, регистрацию ключевых параметров PM и запись данных в лог-файл.

В автоматическом режиме ПО позволяет осуществлять сканирование по энергиям потока частиц на детекторе для заданного диапазона положений мишени и детектора. При этом пользователем задаются такие параметры как время экспозиции, шаг изменения потенциала на анализирующих сетках детектора, шаг изменения угла положения мишени и детектора, диапазон углов для мишени и детектора. В зависимости от целей эксперимента, пользователь может осуществлять либо подробное, либо быстрое сканирование. Подобные измерения позволяют получить информацию об угловых распределениях рассеянных и отраженных частиц различных энергий при различных углах освещения мишени.

ПО Внедрение ДЛЯ автоматизированного управления стендом нейтральных частиц позволило сократить время, затрачиваемое на пространственного распределения вторичных регистрацию частиц И провести ряд работ по изучению спектров рассеяния вторичных нейтральных атомов положительных поверхности И И отрицательных частиц С 82

вольфрамовой и покрытой золотом мишеней при их облучении потоками ионов остаточного газа и нейтральными атомами. Проведенные работы позволили получить информацию об энергетическом распределении вторичных ионов, оценить эффективность выхода положительных и отрицательных частиц, получить информацию об углах рассеяния частиц на вольфрамовой мишени. Примеры полученных распределений при облучении мишени потоками нейтралов приведены на рисунке 52.



Рисунок 52. Пространственное распределения нейтральных атомов, а также отрицательных и положительных частиц при облучении вольфрамовой мишени потоком нейтральных атомов.

Эксперименты со стендом нейтральных частиц, связанные с изучением процессов взаимодействия нейтральных атомов и заряженных частиц с различными поверхностями [62] будут продолжены в рамках работ по созданию приборов будущих лунных миссий. Также, как показывает опыт зарубежных коллег [61, 22], созданная установка позволит получить дополнительные данные, необходимые для настроек и калибровок создаваемых конвертеров нейтральных частиц [81, 19].

3.4 Программа для автоматической проверки функционирования лабораторных прототипов спектрометров солнечного ветра

Для автоматизации проведения исследований характеристик лабораторных прототипов модулей электронной оптики спектрометров ионов и электронов, лишенных собственных модулей электроники и детекторных узлов [А6], было разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять управление внешними источниками питания, производить сбор данных с лабораторного координатно-чувствительного детектора, контролировать амплитудные распределения сигналов с анодов и пространственное распределение частиц на КЧД. В автоматическом режиме ΠО позволяет осуществлять сканирование ПО трем потенциалам, осуществляя либо подбор оптимальных напряжений на элементах электронной оптики, либо производя регистрацию энергетических и массовых спектров заряженных частиц. Интерфейс программы приведен на рисунке 53.

Программа позволяет контролировать амплитудные распределения сигналов с анодов и пространственное распределение частиц на КЧД. Для управления лабораторными источниками питания и оцифровки сигналов с анодов используется многофункциональный модуль NI PXIe-6368. В автоматическом режиме ПО позволяет осуществлять сканирование по трем потенциалам, осуществляя либо подбор оптимальных напряжений на элементах электронной оптики, либо производя регистрацию энергетических и массовых спектров заряженных частиц. Шаг, диапазон изменения и время экспозиции задаются пользователем при начале работы.



Рисунок 53. Интерфейс пользователя программы для автоматической настройки и проверки функционирования лабораторных прототипов спектрометров солнечного ветра.

С использованием данного программного обеспечения была проведена проверка функционирования лабораторного прототипа электроннооптической схемы прибора для регистрации параметров солнечного ветра. Прототип прибора построен на основе фильтра Вина и электростатического анализатора и предназначен для работы с частицами в широком диапазоне энергий 0.5–10 кэВ, характерном для протонов солнечного ветра, с протонов альфа-частиц. возможностью разделения И Энергетическое разрешение прибора $\Delta E/E$ составляет 5%. В качестве детектора заряженных частиц использовался ВЭУ-6.

На рисунке 54 приведен комбинированный спектр ионов, полученный при работе на остаточном газе и с напуском различных рабочих газов.



Рисунок 54. **А** – комбинированный массовый спектр частиц, полученный при работе на остаточном газе и с напуском различных рабочих газов (гелий, углекислота, аргон); **Б** – лабораторный прототип электронно-оптической схемы прибора для регистрации параметров солнечного ветра. 1 – фильтр Вина, 2 – электростатический анализатор, 3 – детектор ВЭУ-6.

Выводы главы 3

Введение автоматизированных методов исследования приборов и их узлов позволяет не только упростить процесс отработки приборов, но и обеспечить подробное исследование свойств научной аппаратуры, не достижимое в ручном режиме, снизить влияние человеческого фактора на результаты испытаний. От достоверности и полноты проведенных испытаний зависит качество получаемой научной информации в процессе выполнения космического эксперимента.

Созданный аппаратно-программный комплекс (АПК), включающий в себя несколько рабочих мест, позволяет решать задачи настроек и калибровок как отдельных узлов, так и готовых образцов спектрометров ионов и электронов, детекторов нейтральных атомов. Важным моментом является возможность проведения термовакуумных испытаний в составе АПК. Рабочие места оснащены всем необходимым диагностическим и измерительным оборудованием, необходимым для мониторинга параметров условий функционирования приборов. Входящее в состав АПК программное обеспечение существенно облегчает работу испытателя с лабораторным предусмотренные оборудованием, a сценарии автоматизированного тестирования радикально снижают время, затрачиваемое на определение характеристик объекта исследования. При этом АПК обладает существенной степенью гибкости, что позволяет в короткие сроки адаптировать его либо под выполнение дополнительных тестов, либо под работу с новым оборудованием или научными приборами.

АПК хорошо зарекомендовал себя в процессе работ по настройкам и калибровкам образцов прибора АРИЕС-Л в рамках проекта Луна-25. Также АПК будет использован для испытаний спектрометров в проектах Луна-26 и Луна-27, Резонанс, Странник.

Глава 4. Пылеударный масс-спектрометр ПИПЛС-А

Глава написана с использованием материалов из работ автора А1 и А7.

4.1 Научные задачи эксперимента ПИПЛС-А

ПИПЛС-А — пылеударный масс-спектрометр с ионизацией частиц пыли в результате высокоскоростного взаимодействия с материалом мишени. Разрабатываемый прибор предназначен для регистрации следующих характеристик пылевых частиц: масса, компонента скорости, элементный состав, заряд.

Проведение этих измерений позволит получить информацию о пространственном распределении частиц пыли вблизи Солнца в плоскости эклиптики и вне ее; 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. [А7]

4.2 Конструкция и принцип работы прибора ПИПЛС-А

Прибор представляет собой моноблок, включающий в себя детектор влета, мишень-ионизатор, времяпролетную систему, модуль электроники. Структура прибора показана на рисунке 55.

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



Рисунок 55. Структура прибора ПИПЛС-А. 1 – детектор влета; 2 – рефлектрон; 3 – корректирующая линза; 4 – детектор на основе микроканальных пластин (МКП); 5 – мишень-ионизатор; 6 – модуль электроники. Также показана траектория движения пылевой частицы и ионов, образованных в результате взаимодействия частицы с мишенью-ионизатором.

Определение скорости пылевых частиц и их массы

Прибор в представленной конфигурации позволяет определить вертикальную составляющую вектора скорости пылинки по времени между моментом влета частицы в прибор и ударом частицы о мишень. Для обеспечения этих измерений используется узел детектора влета. Детектор влета представляет собой систему из трех сеток, две из которых заземлены, а третья подключена к зарядочуствительному усилителю. Прототип системы детектирования пролета пылевых частиц – детектор траекторий для проекта DuneXpress [45]. Диаграмма детектора влета приведена на рисунке 56.



Рисунок 56. Структура детектора пролета

Все пылевые частицы несут электрический заряд, образовавшийся в результате взаимодействия солнечного ветра с их. Движение заряженной частицы в детекторе пролета индуцирует ток на сигнальной сетке детектора влета. Структура предлагаемого детектора влета может быть модифицирована с целью получения информации о векторе скорости детектируемых частиц [73]. Однако, это повлечет усложнение конструкции и увеличение веса, что в рамках проекта "Интергелиозонд" достаточно критично. Сигнал с детектора влёта служит стартом для отсчета времени пролета пылевой частицы в приборе.

При взаимодействии пылевой частицы с мишенью-ионизатором на высоких скоростях образуется плазменное облако из материала частицы и материала мишени. Это облако уносит заряд: $Q = \alpha m v^{\beta}$, где Q – регистрируемый заряд, m – масса частицы, v – ее скорость, α и β – экспериментальные коэффициенты [21], зависящие как от параметров калибровок прибора [48], так и от материала пылевой частицы [43]. Соответственно на мишени образуется заряд противоположного знака, что позволяет определить ее массу [83]. Время регистрации заряда с мишени служит стоповым импульсом при расчете времени пролета пылевой частицы через прибор. По задержке между появлениями сигналов на детекторе влета и мишени-ионизаторе оценивается составляющая вектора скорости движения частицы.

мишени-ионизатору, Для регистрации заряда, сообщенного аналого-цифровым используется зарядочуствительный усилитель с преобразователем (АЦП). В рамках создания лабораторного прототипа прибора был разработан узел для определения заряда, сообщенного мишени, проведены его предварительные испытания, показана работоспособность предлагаемой схемы. Сигнал, регистрируемый с мишени, приведен на рисунке 57. Удар частицы по мишени моделировался при помощи импульсного лазера.



Рисунок 57. Сигнал, снимаемый с мишени лабораторного прототипа прибора при моделировании высокоскоростного удара пылевой частицы в лабораторных условиях.

Определение элементного состава пылевых частиц

При взаимодействии мишени-ионизатора с пылевыми частицами на скоростях выше 3 км/с происходит практически полная ионизация материала частицы и частичная ионизация материала, выбиваемого из мишени [44]. Образовавшееся при таком взаимодействии 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 (МКП) [84]. На основании получаемых времяпролетных спектров ионов делается заключение о элементном составе материала пылевой частицы [65].

Компьютерное моделирование работы прибора

Ha основании поставленных научных задач, была разработана электронно-оптическая схема прибора, обеспечивающая необходимые поля зрения и массовое разрешение при регистрации элементного состава пылевых частиц. Разработка компьютерной модели прибора и определение его аналитических характеристик велась в программе SIMION 8.0. За основу электронно-оптической схемы прибора была взята модель, разработанная сотрудниками лаборатории [17] на этапе проработки заявки на космический В конфигурации эксперимент. начальной модели использовалась сферическая мишень-ионизатор, рефлектрон ОДНИМ электродом-С отражателем и детектор, расположенный в основании мишени.

Детальный анализ исходной модели показал, что данная конфигурация мишени-ионизатора и рефлектора не обеспечивают необходимое поле зрения и не позволяет регистрировать ионы, полученные при взаимодействии частиц с мишенью в областях, близких к краям мишени. Кроме того, использование рефлектрона с одним электродом не позволяло получить требуемое массовое разрешение. Поэтому в существующую модель был внесен ряд изменений. Была изменена геометрия мишени-ионизатора – вместо сферы была применена тороидальная поверхность, точки фокуса которых находились за плоскостью рефлектрона. Это позволило обеспечить регистрацию частиц с границ мишени-ионизатора, что расширило поле зрения прибора и обеспечило лучшую фокусировку ионов на детекторе. Схемы электроннооптических схем прибора до и после модернизации приведены на рисунке 58.



Рисунок 58. Сравнение электронно-оптических схем прибора. А – исходная модель прибора; В – доработанная модель. Видно, что переработанная модель обеспечивает лучшую фокусировку ионов на детекторе, позволяя регистрировать частицы с краев мишени-ионизатора.

В доработанной компьютерной модели изменено положение детектора, сама модель адаптирована под использование детектора на основе ВЭУ-7; в рефлектрон добавлена дополнительная отражающая сетка для лучшей синхронизации по времени пролета; перед детектором добавлен корректирующий электрод для увеличения эффективности регистрации ионов, пришедших с краев мишени-ионизатора.

4.3 Лабораторный прототип прибора ПИПЛС-А

На основании результатов проведенного моделирования был разработан и изготовлен лабораторный прототип прибора, проведены работы по его настройке и проверке массового разрешения. Работы по изготовлению ИКИ PAH прототипа велись на производственных мощностях с Фотография привлечением специалистов ИЗ смежных отделов. изготовленного прототипа прибора приведена на рисунке 59.



Рисунок 59. Лабораторный прототип прибора ПИПЛС-А

Изготовленный лабораторный прототип прибора соответствует штатному образцу в части геометрии электронно-оптической схемы, однако отличается по применяемым материалам. В лабораторном прототипе корпус прибора изготовлен из сплава АМг6, мишень-ионизатор – из стали с цинковым покрытием. Данные материалы были выбраны из соображений снижения стоимости производства. Кроме того, использование стали в материале мишени обусловлено желанием иметь большее разнообразие содержания химических элементов в массовом спектре прототипа в качестве маркеров на времяпролетных спектрах. В летном образце для изготовления корпуса прибора планируется использовать магниевый сплав, мишень планируется изготавливать из титана с покрытием активной поверхности золотом для обеспечения точной интерпретации получаемых массовых спектров [72].

С изготовленным образцом 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 времяпролетные спектры материала мишени, проведен расчет массового разрешения, подтверждены поля зрения прибора. Пример времяпролетного спектра, полученный в процессе настроек электронно-оптической схемы, приведен на рисунке 60.



Рисунок 60. Времяпролетный спектр, регистрируемый лабораторным прототипом при ионизации материала мишени лазерным воздействием при моделировании высокоскоростного удара пылевой частицы.

На основании проведенных испытаний было определено массового разрешения изготовленного образца. Получено соотношение $M/\Delta M = 50$ для массового пика, соответствующего цинку (64 а.е.м.) по полной ширине на разрабатываемого полувысоте. Основные технические характеристики прибора приведены В таблице 5. Проведенные работы показали достижимость заявленных параметров и возможность решения поставленных научных задач с помощью разрабатываемого прибора.

Технические характеристики		
Bec	3,5 кг	
Габариты	310х288х288 мм	
Энергопотребление	до 10 Вт	
Информативность	0,1-100 Мбит/сутки	
Аналитические характеристики		
Измеряемые параметры	масса, элементный состав, проекция	
	вектора скорости, заряд, поток	
Диапазон масс	10-16-10-6 г	
Диапазон скоростей	3-100 км/с	
Массовое разрешение М/ДМ	больше 30	
Чувствительная площадь	$\sim 500 \text{ cm}^2$	
Поле зрения	45°	

Таблица 5. Основные характеристики прибора ПИПЛС-А

4.4 Рабочее место для испытаний образцов прибора ПИПЛС-А

Для настройки и проведения испытаний образцов прибора ПИПЛС-А создано рабочее место, состоящее из вакуумной камеры, оснащенной безмасляной системой откачки, датчиками контроля уровня вакуума, оптическим окном, имеющим просветление на длину волны лазерного излучателя, и электрическими вводами. Схема рабочего места приведена на рисунке 61.



Рисунок 61. Схема рабочего места для проведения функциональных испытаний образцов прибора ПИПЛС-А

Для моделирования высокоскоростного удара использовался твердотельный ультрафиолетовый лазер с возможностью изменения энергии и длительности импульса. Варьирование данных параметров позволяет воздействие мишень-ионизатор моделировать на пылевых частиц с различными массами и скоростями. Рабочее место также оснащено лабораторными высоковольтными и низковольтными источниками питания и осциллографом. Во время проведения испытаний и настроек прототипа прибора использовались внешние высоковольтные источники питания, что позволяло испытывать образцы времяпролетных модулей без применения штатных модулей электроники прибора. Пример размещения лабораторного прототипа прибора в вакуумной камере приведен на рисунке 62.



Рисунок 62. Размещение лабораторного прототипа прибора в вакуумной камере перед началом функциональных испытаний.

4.5 Прототипы прибора и сравнение характеристик прибора с аналогами Разработка пылеударного масс-спектрометра велась с учетом

пылеударного масс-спектрометра велась С учетом имеющегося опыта по созданию аналогичных приборов у отечественных и зарубежных коллег. Прототипами электронно-оптической схемы прибора можно считать пылевой детектор LAMA для проекта DuneXpress [45], пылевой детектор для проекта Cassini – Cosmic Dust Analyzer [83], детектор пылевых частиц Ulysses Dust Detector [46] и пылеударный масс-анализатор ПУМА [8]. Данные приборы были изготовлены И испытаны на функционирование. Прибор Cosmic Dust Analyzer, успешно функционировал в рамках проекта Cassini [71], а прибор ПУМА – в проекте Вега. В таблице 6 приведены основные характеристики рассматриваемых пылевых детекторов.

Таблица 6. Сравнение характеристик пылевых детекторов

	Технические		ие	Аналитические
Название	характеристики		ики	характеристики, измеряемые
прибора	Bec	Потребле ние	Площадь мишени	параметры
LAMA, DuneXpress	15 кг	16-25 Вт	~ 1m ²	Измерение заряда пылевых частиц; определение траекторий движения частиц; определение скорости движения частиц; проведение элементного и изотопного;
				анализа пылевых частиц с разрешением M/ Δ M >10
Cosmic Dust Analyzer, Cassini	17 кг	12 Вт	0.1 m ²	Измерение заряда пылевых частиц; определение скорости движения частиц; определение массы пылевых частиц; проведение элементного и изотопного анализа с разрешением М/ΔМ~50
Ulysses dust detector	3.75 кг	2 Вт	200 см ²	Определение массы частиц; определение скорости движения частиц; определение заряда частиц; определение потока частиц, направления потока
ПИПЛС-А	3.5 кг	9-10 Вт	500 см ²	Определение проекции вектора скорости движения частиц; массы пылевых частиц; проведение элементного анализа М/АМ – 50

Выводы главы 4

Масс-спектрометр ПИПЛС-А, создаваемый в рамках космической миссии Интергелиозонд, предназначен для детектирования характеристик микрометеоритов и пылевых частиц. Прибор позволяет определять основные характеристики частиц: массу, заряд, элементный состав, составляющую вектора скорости. Проведение измерений параметров пылевых частиц позволит получить информацию о составе межзвездной и межпланетной пыли, распределении пылевых частиц различного происхождения по массам, оценить потоки частиц на различных участках орбиты КА.

В рамках работ по созданию пылеударного масс-спектрометра проведено компьютерное моделирование функционирования его электроннооптической схемы. Совместно с техническими специалистами ИКИ РАН разработана конструкторская модель прибора и изготовлен лабораторный прототип. Проведены испытания лабораторного прототипа прибора, в результате которых были экспериментально подтверждены поля зрения прибора и достижимость требуемого массового разрешения М/ΔМ.

По сравнению с существующими аналогами, прибор ПИПЛС-А имеет следующие преимущества: обеспечение получения полной информации о параметрах частицы, малый вес, компактные размеры. Кроме проекта «Интергелиозонд», прибор может быть использован и в других межпланетных миссиях, требующих измерений пылевой компоненты и микрометеоритов.

Заключение

В диссертации представлены результаты работ по созданию электроннооптических схем приборов для регистрации параметров солнечной плазмы и пылевых частиц, результаты лабораторных отработок разрабатываемых приборов и их узлов, результаты создания аппаратно-программного комплекса для наземных испытаний научной аппаратуры.

Разработана модель нового типа плазменного энерго-масс анализатора ПИПЛС-Б, сочетающего в себе электростатический метод разделения частиц по соотношению E/Q и магнитный для разделения частиц выбранной энергии по соотношению M/Q. Прибор способен регистрировать заряженные частицы в диапазоне энергий от 700 эВ до 20 кэВ с высоким энергетическим и массовым разрешением. Прибор предназначен для изучения ионного и зарядового состава солнечного ветра и его источников в солнечной короне в рамках проекта Интергелиозонд. Отличительными особенностями прибора являются: одномоментная регистрация массового состава ионов выбранной энергии, высокое энергетическое (∆Е/Е≤5%) и массовое (М/∆М=60) разрешение, широкий энергетический диапазон.

Кроме проекта Интергелиозонд, 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.

Проведено моделирование параметров электронно-оптической схемы энерго-масс анализатора АРИЕС-Л, создаваемого в рамках космической миссии Луна-25, выполнены лабораторные испытания, отработка и настройки образцов прибора.

На основании результатов моделирования и испытаний, разработана методика настроек модулей электронной оптики прибора 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. Полученные в результате испытаний аналитические характеристики прибора превосходят значения, полученные для его предшественников на космических аппаратах Фобос-Грунт и BepiColombo. Прибор прошел полный цикл испытаний, подтверждающих его готовность к работе на космическом аппарате. Выполнены работы по планированию научных измерений в составе космического аппарата на поверхности Луны, функционирование прибора по циклограммам запланированных измерений проверено в вакуумной камере.

Проведенные подробные исследования аналитических характеристик прибора АРИЕС-Л позволят высокой С достоверностью проводить интерпретацию научных данных, получаемых В ходе выполнения космического эксперимента на аппарате Луна-25, целью которого является проведение изучения элементного состава реголита в области посадки методами вторичной ионной масс-спектрометрии, исследование процессов взаимодействия солнечного ветра С реголитом, измерения потоков нейтральных атомов. Полученный опыт по настройкам прибора будет энерго-масс-спектрометров использован при создании аналогичной конструкции, входящих в состав научной аппаратуры космических миссий Луна-26 (орбитальный аппарат), Луна-27 (посадочный аппарат) и Странник (магнитосферный эксперимент).

Создан аппаратно-программный комплекс (АПК) для лабораторных отработок плазменных приборов. Комплекс включает в себя несколько рабочих мест и позволяет решать задачи настроек и калибровок как отдельных узлов, так и готовых образцов спектрометров ионов и электронов, детекторов нейтральных атомов, обеспечивает возможность проведения термовакуумных испытаний. Для автоматизированного управления рабочими местами разработано специальное программное обеспечение. Введение автоматизированных методов исследования приборов и их узлов упрощает процесс отработки приборов, и обеспечивает подробное исследование свойств научной аппаратуры, не достижимое В ручном режиме.

Использование комплекса также позволяет радикально сократить время, затрачиваемое на исследования характеристик приборов.

АПК успешно использовался при настройках и калибровках образцов ионного энерго-масс анализатора АРИЕС-Л в рамках проекта Луна-25. Также АПК будет использован для испытаний спектрометров в проектах Луна-26 и Луна-27, Резонанс, Странник. Созданный комплекс и входящее в его состав программное обеспечение обладают существенной степенью гибкости, и могут быть короткие сроки адаптированы под работу с новым оборудованием или научными приборами.

Проведено моделирование пылеударного масс-спектрометра ПИПЛС-А для проекта Интергелиозонд, изготовлен и испытан лабораторный прототип прибора. Спектрометр позволяет определять массу, заряд, элементный состав, составляющую вектора скорости межпланетных пылевых частиц. В ходе космического эксперимента прибор позволит получить информацию о составе межзвездной и межпланетной пыли, распределении пылевых частиц различного происхождения по массам, оценить потоки частиц на различных участках орбиты КА. По сравнению с существующими аналогами, прибор ПИПЛС-А имеет следующие преимущества: обеспечение получения полной информации о параметрах частицы, малый вес, компактные размеры.

Модификации прибора ПИПЛС-А могут быть использованы в различных межпланетных миссиях, требующих измерений пылевой компоненты и микрометеоритов. В зависимости от целей и задач эксперимента, прибор может быть либо дооснащен дополнительными модулями для получения более полной информации о пылевых частицах, либо упрощен в целях снижения энергопотребления и веса.

Благодарности

Выражаю глубочайшую благодарность моему научному руководителю, Вайсбергу Олегу Леонидовичу за возможность работать в области космических исследований, за колоссальный опыт, вдохновение, критику и поддержку.

Благодарю за поддержку и совместную работу своих коллег: Журавлева Романа Николаевича, Шестакова Артёма Юрьевича, Шувалова Сергея Димитриевича. Благодарю за участие в создании прототипа пылеударного спектрометра Маркичева Максима Игоревича, Глазкина Дмитрия Николаевича, Коновалова Алексея Александровича, Гусева Сергея Марковича и Ануфрейчика Константина Владимировича. Большое спасибо Кузьмину Александру Константиновичу и Ермолаеву Юрию Ивановичу за рецензирование и критику работы на этапе подготовки рукописи.

Выражаю признательность коллективу НПП «Астрон-Электроника», в особенности Моисееву Павлу Петровичу, Митюрину Максиму Владимировичу, Ничушкину Ивану Ивановичу, Васильеву Александру Дамировичу, Родькину Евгению Ивановичу. Надеюсь на дальнейшее плодотворное сотрудничество И добрые товарищеские отношения. Владимировича Благодарю Летуновского Валерия за подробные консультации при работе с конструкторскими моделями и Каримова Бориса Талгатовича за совместную работу над ДКП.

Большое спасибо моей семье за поддержку и сопереживания.

Список сокращений

АПК	аппаратно-программный комплекс
АРИЕС-Л	широкоугольный ионный энерго-масс анализатор для проекта Луна-25
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
ВЭУ	вторичный электронный умножитель
ИКИ РАН	Институт космических исследований Российской академии наук
ИН	источник нейтральных частиц
КА	космический аппарат
КДО	конструкторско-доводочный образец
КЧД	координатно-чувствительный детектор
МКП	микроканальные пластины
МΠ	межпланетная пыль
МЭО	модуль электронной оптики
НПП АЭ	Научно-производственное предприятие «Астрон- Электроника»
ПО	программное обеспечение
ПИПЛС-А	пылеударный масс-спектрометр для проекта Интергелиозонд
ПИПЛС-Б	ионный энерго-масс анализатор для проекта Интергелиозонд
PM	рабочее место
РМ ФИ	рабочее место для функциональных испытаний
СКБ КП	Специальное конструкторское бюро космического приборостроения
ТВИ	термовакуумные испытания
ШО	штатный образец
ЭСА	электростатический анализатор

Доклады на конференциях по теме диссертации

2013 год:

Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» в ИКИ РАН, Энерго-масс анализатор для проекта Интергелиозонд, Вайсберг О.Л., Моисеенко Д.А.

Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» в ИКИ РАН, Энерго-масс анализатор для проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД (с перспективой применения для исследования поверхностей планет), Моисеенко Д.А., научный руководитель: Вайсберг О.Л.

The fourth Moscow Solar System Symposium (4M-S3), Energy-mass spectrometer for plasma measurements at Ganymede, D. Moiseenko, O. Vaisberg, G. Koynash, A. Shestakov, R. Zhuravlev, A.J. Coates, G.H. Jones, C.S. Ar-ridge, D.O. Kataria

2014 год:

COSPAR MOSCOW 2014, Experiment ARIES-L for investigation of Lunar regolith by means of sims and secondary neutras mass-spectrometry on russian lunar missions, O.Vaisberg, R.Zhuravlev, D.Moiseenko, A.Shestakov, S.Podkolzin, P.Moiseev, A.Koziura, M.Mitjurin, E.Rodkin, D.Trufanov, V.Kurnaev, N.Mamedov, D.Sinelnikov

Конференция National Instruments, Использование модульных систем РХІ при наземной отработке приборов для космических экспериментов, Моисеенко Д.А., Шестаков А.Ю.

2015 год:

Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» в ИКИ РАН, Эксперимент АРИЕС-Л по исследованию лунного реголита методом вторичной ионной массспектрометрии (ВИМС) для проекта ЛУНА-25, Р.Н. Журавлев, О.Л. Вайсберг, Д.А. Моисеенко, А.Ю. Шестаков, П.П. Моисеев, М.В. Митюрин, А.В. Козюра.

Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» в ИКИ РАН:

Детектор пыли ПИПЛС-А для проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД, Д.А. Моисеенко, Д.Н. Глазкин, научный руководитель: О.Л. Вайсберг.

Лабораторные отработки прибора АРИЕС-Л для проекта Луна-Глоб, Моисеенко Д.А., Журавлев Р.Н., Шестаков А.Ю., Митюрин М.В., научный руководитель: Вайсберг О.Л.

2016 год:

Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» в ИКИ РАН:

Пылеударный масс-спектрометр для проекта Интергелиозонд : Моисеенко Д.А., Глазкин Д., Маркичев М.В., научный руководитель: Вайсберг О.Л.

Энерго-масс анализатор ПИПЛС-Б для проекта Интергелиозонд, Моисеенко Д.А.(1), Митюрин М.В., научный руководитель: Вайсберг О.Л.

Лабораторные отработки прибора АРИЕС-Л для проекта Луна-Глоб, Моисеенко Д.А., Журавлев Р.Н., Шестаков А.Ю., Митюрин М.В., Ничушкин И.И., научный руководитель: Вайсберг О.Л.

The Seventh Moscow Solar System Symposium (7M-S3), Scientific objectives and preliminary parameters of ARIES-L instrument qualification model for LUNA-Glob mission, D.Moiseenko, O.Vaisberg, R.Zhuravlev, A.Shestakov, S. Shuvalov, P.Moiseev, V. Letunovsky, M.Mitjurin, A.Koziura, E.Rodkin, I. Nichushkin

2017 год:

Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» в ИКИ РАН:

Пылеударный масс-спектрометр для проекта Интергелиозонд: Моисеенко Д.А., Глазкин Д., Маркичев М.В., Вайсберг О.Л.

Лабораторные испытания прибора АРИЕС-Л, Моисеенко Д.А., Журавлев Р.Н., Шестаков, А.Ю., Шувалов С.Д., Митюрин М.В., Нечушкин И.И., Родькин Е.И., научный руководитель: Вайсберг О.Л.,

Конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2017» в ГАО РАН, Комплекс малогабаритной аппаратуры для мониторинга и диагностики корпускулярного излучения Солнца Моисеенко Д.А., Зимовец И.В., Журавлев Р.Н., Шестаков А.Ю., Шувалов С.Д., Шарыкин И.Н., Вовченко И.С., Вайсберг О.Л.

The Eighth Moscow Solar System Symposium (8M-S3):

Functional tests of ARIES-L instrument, D.A. Moiseenko, O.L. Vaisberg, R.N. Zhuravlev, S.D. Shuvalov, A.Yu. Shestakov, P.P. Moiseev, M.V. Mitjurin, E.I. Rodkin, V.V. Letunovsky, I.I. Nichushkin, A.D. Vasiliev

Complex of low-weight miniature instruments for solar wind monitoring, D.A. Moiseenko, A. Yu. Shestakov, R.N. Zhuravlev, I.V. Zimovets, O.L. Vaisberg, S.D. Shuvalov

2018 год:

EGU2018-7743, Concept of small-sized instruments for monitoring and diagnostics of solar wind, Shestakov Artyom, Moiseenko Dmitry, Shuvalov Sergey, Zhuravlev Roman, Zimovets Ivan, and Vaisberg Oleg

SPEXP-2018, Samara, Perspectives of miniature instruments for development of global magnetospheric monitoring and early alert network Shestakov A.Yu., Vaisberg O.L., Shuvalov S.D., Moiseenko D.A., Zhuravlev R.N.

Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» в ИКИ РАН:

Стенд нейтралов - устройство для исследования процессов взаимодействия частиц с поверхностями Моисеенко Д.А., Шестаков А.Ю., Хуанг Дж., Митюрин М.В., Семенов В.В., Васильев А.Д., Козюра А.В., научный руководитель: О.Л. Вайсберг.

Функциональные испытания прибора АРИЕС-Л, Моисеенко Д.А., Журавлев Р.Н., Шестаков А.Ю., Шувалов С.Д., Митюрин М.В., Нечушкин И.И., Родькин Е.И., научный руководитель: О.Л. Вайсберг.

Промышленный саммит National Instruments, Комплекс для калибровки и наземной отработки приборов для космических миссий, Моисеенко Д.А.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в рецензируемых 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. 2016. V.56(7). P.781–841. doi:10.1134/s0016793216070124.

А2 Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Митюрин М.В., Моисеев П.П. Массанализатор ионов солнечного ветра для проекта «Интергелиозонд» // Приборы и техника эксперимента 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. 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 2016. V.666 P.012032. doi:10.1088/1742-6596/666/1/012032

А5 Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Шестаков А.Ю. и др. Аппаратнопрограммный комплекс для настроек и калибровок ионных массспектрометров для космических миссий // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 3. С.52–62. doi: 10.1134/S0032816219020265

Аб 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. 2018. Т. 61. No 5. C. 398—402 doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-398-402

А7 Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Глазкин Д.Н. Лабораторный прототип пылеударного масс-анализатора ПИПЛС-А для проекта «Интергелиозонд» // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 1. С.75–78. doi: 10.1134/S0032816218060113
Библиографический список используемой литературы

- 8.Анучина Н.Н., Волков В.И., Евланов Е.Н. и др. Расчетно-теоретические исследования по интерпретации масс-спектрометрических измерений состава пылевых частиц кометы Галлея в экспериментах Вега // Физика горения и взрыва. 2004. Т.40. №3
- 9.Вайсберг О.Л., Койнаш Г.В., Моисеев П.П. и др. Изучение ионизационного состояния солнечного ветра в миссии Интергелиозонд // Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Труды рабочего совещания. 2011. ISSN 2075-6836. C.151-155
- 10.Вайсберг О.Л., Аванов Л.А., Лейбов А.В. и др. Панорамный плазменный спектрометр камера всего неба для заряженных частиц // Космич. исслед. 2005. Т. 43. № 5. С. 390-394.
- 11.Горн Л.С., Хазанов Б.И. Позиционно-чувствительные детекторы // Москва, Энергоиздат, 1982 (Б-ка по автоматике; Вып 625)
- 12.Готт Ю.В., Курнаев В.А., Вайсберг О.Л., Корпускулярная диагностика лабораторной и космической плазмы // М.: МИФИ, 2008
- 13.Застенкер Г.Н., Федоров А.О. и др. Особенности ис-пользования интегральных цилиндров Фарадея на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 // Космич. исслед. 2000. Т. 38. No 1. C. 23–30.
- 14.Зерцалов А.А., Вайсберг О.Л., Темный В.В. Характеристики протонной и αкомпонент солнечного ветра после прохождения межпланетных ударных волн по наблюдениям на спутнике «Прогноз» 15 и 30.V.1972 г. // Космические исследования. 1976. Т.14 Вып. 2. С.257-264
- 15.Казмерчук П.В., Мартынов М.Б., Москатиньев И.В., Сысоев В.К., Юдин А.Д. Космический аппарат "Луна-25" основа новых исследований Л уны // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4 (34). С. 9-19.
- 16.Кузнецов В.Д., Научные задачи проекта Интергелиозонд // Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Труды рабочего совещания. 2011. ISSN 2075-6836. С.5-14
- 17.Шахвердян Т.А., Вайсберг О.Л., Срама Р. Изучение межзвездной и межпланетной пыли вблизи Солнца в миссии Интергелиозонд (детектор пыли ПИПЛС-А) // Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Труды рабочего совещания. 2011. ISSN 2075-6836. С.144-150
- 18.Abbo L., Ofman L., Antiochos S. K., et al. Slow Solar Wind: Observations and Modeling // Space Science Reviews. 2016. V.201(1-4). P. 55–108. doi:10.1007/s11214-016-0264-1

- 19.Aellig M. R., Wurz P., Schletti R., et al. 'Surface Ionization with Cesiated Converters for Space Applications // Geophysical Monograph. 1998. 103. Am. Geophys. Un., Washington, DC, P. 289.
- 20.Antiochos S. K., Mikić Z., Titov V. S., et al. A Model For The Sources Of The Slow Solar Wind // The Astrophysical Journal. 2011. V.731(2). P.112. doi:10.1088/0004-637x/731/2/112
- 21.Auer S. Interplanetary Dust // Instrumentation. 2001. ed. by E. Grün, B.A.S. Gustafson, S. Dermott, H. Fechtig. Springer, Berlin, P. 387–438
- 22.Barabash S., Sauvaud J.-A., Gunell H., et al. The Analyser of Space Plasmas and Energetic Atoms (ASPERA-4) for the Venus Express mission // Planetary and Space Science. 2007. V.55(12). P.1772–1792. doi:10.1016/j.pss.2007.01.014
- 23.Bitter R., Mohiuddin T., Nawrocki M. LabVIEW: Advanced programming techniques, 2ndedn. // CRC Press, Florida, 2006. ISBN: 0-8493-3325-3
- 24.Blush L. M., Allegrini F., Bochsler P., et al. Development and calibration of major components for the STEREO/PLASTIC (plasma and suprathermal ion composition) instrument // Advances in Space Research. 2005. V.36(8). P.1544– 1556. doi:10.1016/j.asr.2005.07.028
- 25.Burch J. L., Moore T. E., Torbert R. B., & Giles B. L. Magnetospheric Multiscale Overview and Science Objectives // Space Science Reviews. 2015. V.199(1-4). P.5–21. doi:10.1007/s11214-015-0164-9
- 26.Burns J., Lamy P., Soter S., Radiation forces on small particles in the solar system // Icarus. 1979. V.40(1). P.1-48. doi:/10.1016/0019-1035(79)90050-2
- 27.Colaprete A., Sarantos M., Wooden D. H. et al. How surface composition and meteoroid impacts mediate sodium and potassium in the lunar exosphere// Science. 2015. V.351(6270). P.249–252. doi:10.1126/science.aad2380
- 28.Collinson G. A., Dorelli J. C., Avanov L. A., et al. The geometric factor of electrostatic plasma analyzers: A case study from the Fast Plasma Investigation for the Magnetospheric Multiscale mission // Review of Scientific Instruments. 2012. V.83(3). P.033303. doi:10.1063/1.3687021
- 29.Daoudi H., Blush L. M., Bochsler P. et al. The STEREO/PLASTIC response to solar wind ions (Flight measurements and models) // Astrophys. Space Sci. Trans. 2009. V.5. P.1-13. doi:10.5194/astra-5-1-2009
- 30.Dorschner J., Henning T. Dust metamorphis in the galaxy // Astron. Astrophys. Rev. 1995. V.6. P.271–333.
- 31.Dukes C. A., & Johnson R. E. Contribution of Surface Processes to the Lunar Exosphere // Encyclopedia of Lunar Science. 2017. P.1–7. doi:10.1007/978-3-319-05546-6_96-1

- 32.Eckstein W. Charge fractions of reflected particles Inelastic Particle–Surface Collisions // 1981. Chemical Physics. V.17. P.157–83
- 33.Eichelberger H., Fremuth G., Prattes G. et al. BepiColombo-MPO-SERENA-PICAM EMC measurements // ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC). 2016. P.1-4. doi:10.1109/AeroEMC.2016.7504548.
- 34.Elphic R. C., Funsten H. O., Barraclough B. L. et al. Lunar surface composition and solar wind-Induced secondary ion mass spectrometry // Geophysical Research Letters. 1991. V.18(11). P.2165–2168. doi:10.1029/91gl02669
- 35.Engelhardt I. A. D., Wahlund J.-E., Andrews D. J. et al. Plasma regions, charged dust and field-aligned currents near Enceladus // Planetary and Space Science. 2015. V.117. P.453–469. doi:10.1016/j.pss.2015.09.010
- 36.Futaana Y., Barabash S., Holmström M., & Bhardwaj A. Low energy neutral atoms imaging of the Moon // Planetary and Space Science. 2006. V.54(2). P.132–143. doi:10.1016/j.pss.2005.10.010
- 37.Galvin A., Kistler L., Popecki M. et al. The Plasma and Suprathermal Ion Composition (PLASTIC) Investigation on the STEREO Observatories // Space Sci. Rev. 2008. V.136. P.437–486
- 38.Geiss J., Gloeckler G., Von Steiger R. Origin of the solar wind from composition data // Space Science Reviews. 1995. V.72(1-2). P.49–60. doi:10.1007/bf00768753
- 39.Gloeckler G., Geiss J., Balsiger H., et al. The Solar Wind Ion Composition Spectrometer // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. Ulysses Instruments Special Issue. 1992. V.92. No. 2, P.267-289
- 40.Gloeckler G., Balsiger H., Buergi A., et al. The solar WIND and suprathermal ion composition investigation on the WIND spacecraft // Space Science Reviews. 1995. V.71(1-4). P.79–124. doi:10.1007/bf00751327
- 41.Gloeckler G. Implications of the observed anticorrelation between solar wind speed and coronal electron temperature // Journal of Geophysical Research. 2003. V.108(A4). doi:10.1029/2002ja009286
- 42.Gloeckler G., Cain J., Ipavich F. M., et al. Investigation of the composition of solar and interstellar matter using solar wind and pickup ion measurements with SWICS and SWIMS on the ACE spacecraft // Space Science Reviews. 1998. V.86(1/4). P.497–539. doi:10.1023/a:1005036131689
- 43.Göller J., Grün E., Calibration of the Galileo/Ulysses dust detectors with different projectile materials and at varying impact angles // Planet. Space Sci. 1998. V.37. P.1197–1206. doi: 10.1016/0032-0633(89)90014-7
- 44.Grün E., Srama R., Krüger H., et al. Kuiper prize lecture: Dust Astronomy // Icarus. 2005 V.174(1). P.1-14. doi:/10.1016/j.icarus.2004.09.010.

- 45.Grün E., Srama R., Altobelli N. et al. DuneXpress // Exp. Astron. 2009. V. 23(3)
 P. 981. doi:/10.1007/s10686-008-9099-4
- 46.Grün E., Fechtig H., & Kissel J. et al. The Ulysses dust experiment // Astron. Astrophys. 1992. Suppl. Ser. 92.
- 47.Halekas J. S., Taylor E. R., Dalton G., et al. The Solar Wind Ion Analyzer for MAVEN. // Space Science Reviews. 2013. V.195(1-4). P.125–151. doi:10.1007/s11214-013-0029-z
- 48.Horányi M., Sternovsky Z., Lankton M., et al. The Lunar Dust Experiment (LDEX) Onboard the Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE) Mission // Space Science Reviews. 2014. V.185(1-4). P.93–113. doi:10.1007/s11214-014-0118-7
- 49.Hughes A. L., & Rojansky, V. On the Analysis of Electronic Velocities by Electrostatic Means // Physical Review. 1929. V.34(2). P.284–290. doi:10.1103/physrev.34.284
- 50.Iglseder H., Uesugi K., & Svedhem H. Cosmic dust measurements in lunar orbit // Advances in Space Research. 1996. V.17(12). P.177–182. doi:10.1016/0273-1177(95)00777-c
- 51.Jakosky B. M., Lin R. P., Grebowsky J. M., et al. The Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) Mission // Space Science Reviews. 2015. V.195(1-4), P.3–48. doi:10.1007/s11214-015-0139-x
- 52.Johnson, R. E., & Baragiola, R. Lunar surface: Sputtering and secondary ion mass spectrometry // Geophysical Research Letters. 1991. V.18(11). P.2169–2172. doi:10.1029/91gl02095
- 53.Kasper J. C., Abiad R., Austin G., et al. Solar Wind Electrons Alphas and Protons (SWEAP) Investigation: Design of the Solar Wind and Coronal Plasma Instrument Suite for Solar Probe Plus. // Space Science Reviews. 2015. V.204(1-4). P.131–186. doi:10.1007/s11214-015-0206-3
- 54.Landgraf M., Baggaley W. J., Grün E., Krüger H., and Linkert G. Aspects of the mass distribution of interstellar dust grains in the solar system from in situ measurements // J. Geophys. Res. 2000. V.105(A5). P.10343–10352. doi:10.1029/1999JA900359.
- 55.Lapington J. S., & Schwarz H. E. The Design and Manufacture of Wedge and Strip Anodes // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1986. V.33(1). P.288– 292. doi:10.1109/tns.1986.4337101
- 56.Los J., & Geerlings J. J. Charge exchange in atom-surface collisions // Physics Reports. 1990. V.190(3). P.133–190. doi:10.1016/0370-1573(90)90104-a
- 57.Lue C., Halekas J. S., Poppe A. R. & McFadden J. P. ARTEMIS observations of solar wind proton scattering off the lunar surface // Journal of Geophysical

Research: Space Physics. 2018. V.123. P.5289–5299. doi:/10.1029/2018JA025486

- 58.Mamyrin, B. A. Time-of-flight mass spectrometry (concepts, achievements, and prospects). // International Journal of Mass Spectrometry. 2001. V.206(3), P.251–266. doi:10.1016/s1387-3806(00)00392-4
- 59.Mann I., Kimura H., Biesecker D. A., et al. Dust Near The Sun // Space Science

 Reviews.
 2004.
 V.110(3/4).
 P.269–305.

 doi:10.1023/b:spac.0000023440.82735.ba
- 60.Martin C., Jelinsky P., Lampton M., Malina R. F. & Anger H. O. Wedge-and-strip anodes for centroid-finding position-sensitive photon and particle detectors // Review of Scientific Instruments. 1981. V.52(7). P.1067– 1074. doi:10.1063/1.1136710
- 61.Moore T. E., Chornay D. J., Collier, M. R., et al. The low-energy neutral atom imager for IMAGE // Space Science Reviews. 2000. V.91(1/2). P.155–195. doi:10.1023/a:1005211509003
- 62.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
- 63.Pollock C., Moore T., Jacques A., et al. Fast Plasma Investigation for Magnetospheric Multiscale // Space Science Reviews. 2016. V.199(1-4). P.331– 406. doi:10.1007/s11214-016-0245-4
- 64.Poynting J. Radiation in the Solar System: Its Effect on Temperature and Its Pressure on Small Bodies // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1904. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character. V.202. P.525-552
- 65.Ratcliff P. R., Reber M., Cole M. J. et al. Velocity thresholds for impact plasma production // Advances in Space Research. 1997. V.20(8). P. 1471-1476
- 66.Reynolds E. L., Driesman A., Kinnison J., & Lockwood, M. K. Solar Probe Plus Mission Overview // AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference. 2013. doi:10.2514/6.2013-4879
- 67.Robertson H. Dynamical Effects of Radiation in the Solar System // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1937. V.97(6). P.423–437
- 68.Sigmund P.. Theory of Sputtering. I. Sputtering Yield of Amorphous and Polycrystalline Targets // Physical Review. 1969. V.184. P.383. doi:10.1103/PhysRev.187.768.
- 69.SIMION Ion and Electron Optics Simulator [Электронный ресурс] URL: https://simion.com

- 70.Smith A., Kessel R., Lapington J. S., & Walton D. M. Modulation effects in wedge and strip anodes // Review of Scientific Instruments. 1989. V.60(11). P.3509–3518. doi:10.1063/1.1140502
- 71.Spilker L. Cassini-Huygens' exploration of the Saturn system: 13 years of discovery // Science. 2019. V.364(6445). P.1046–1051. doi:10.1126/science.aat3760
- 72.Srama R., Ahrens T. J., Altobelli N., et al. The Cassini Cosmic Dust Analyzer // Space Science Reviews. 2004. V.114(1-4). P.465–518. doi:10.1007/s11214-004-1435-z
- 73.Srama R., Altobelli N., de Kam J., et al. DUNE-eXpress Dust astronomy with ConeXpress // Advances in Space Research. 2006. V.38(9). P.2093–2101. doi:10.1016/j.asr.2005.09.009
- 74.Stoermer C.W., Gilb S., Frederich J., et al. A high resolution dual mass gate for ion separation in laser desorption/ionization time of flight mass spectrometer // Rev. Sci. Instr. 1998. P. 1661-1664
- 75.Stone E. C., Frandsen A. M., Mewaldt R. A., et al. The Advanced Composition Explorer // Space Science Reviews. 1998. V.86(1/4). P.1–22. doi:10.1023/a:1005082526237
- 76.Tomková E., Kokešová K., & Nehasil V. Some aspects of measurements with a 127° cylindrical analyzer // Czechoslovak Journal of Physics. 1985. V.35(6), P.621–629. doi:10.1007/bf01595532
- 77.Vaisberg O., Yermolaev Y., Zastenker N., Omelchenko A. Observations of the Heavy Ions in the Solar Wind according to the Data of Prognoz 7 Satellite // Cosmic Res. 1980. V.18(5). P.552-555
- 78.Vaisberg O.L., Koinash G.V., Moiseev P.P. et al. DI-aries panoramic energymass spectrometer of ions for the Phobos-Grunt project // Sol. Syst. Res. 2010. V.44 P.456. doi:10.1134/S003809461005014X
- 79.Vaisberg, O. L. Advanced method for exploration of plasma velocity distribution functions: All-sky camera for very fast plasma measurements // Advances in Space Research. 2003. V.32(3). P.385–388. doi:10.1016/s0273-1177(03)90277-8
- 80.Wahlström P., Scheer J. A., Riedo A., Wurz P., and Wieser M. Test Facility to Study Surface-Interaction Processes for Particle Detection in Space // Journal of Spacecraft and Rockets. 2013. V.50(2). P.402-410. doi:10.2514/1.A32134
- 81.Wahlström, P., Scheer, J. A., Wurz, P., Hertzberg, E., & Fuselier, S. A. Calibration of charge state conversion surfaces for neutral particle detectors // Journal of Applied Physics. 2008. V.104(3). P.034503. doi:10.1063/1.2957064

- 82.Wieser M., Wurz P. Production of a 10 eV–1000 eV neutral particle beam using surface neutralization // Measurement Science and Technology. 2005. V.16(12), P.2511–2516. doi:10.1088/0957-0233/16/12/016
- 83.Willis M. J., Burchell M. J., Cole M. J., McDonnell J. A. M. Influence of impact ionisation detection methods on determination of dust particle flux in space // Planetary and Space Science. 2004. V.52(8). P.711–725. doi:10.1016/j.pss.2004.01.001
- 84.Wiza J.L. Microchannel Plate Detectors // Nuclear Instruments and Methods. 1979. V.162. P.587-601
- 85.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
- 86.Yakshinskiy B. V., Madey T. E. Photon-stimulated desorption as a substantial source of sodium in the lunar atmosphere // Nature. 1999. V.400(6745). P.642– 644. doi:10.1038/23204
- 87.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

Приложение 1. Сравнение результатов функциональных испытаний КДО и ШО АРИЕС-Л



Рисунок 1.1 Результаты проверки относительного пропускания КДО и ШО



Рисунок 1.2 Распределений частиц на детекторе при проверке полей зрения КДО и ШО



Рисунок 1.3 Распределения частиц на детекторе при проверке разрешения по полярному углу. Измерения проводились для четырех азимутов на полярных углах 10 и 40 градусов.



Рисунок 1.4 Распределения частиц на детекторе при проверке разрешения по азимутальному углу. Определение разрешения проводилось по изображениям на детекторе, полученным для полярного угла 40 градусов на азимутальных углах 340°;20°, 150°;190°, 70°;110°, 260°;300°



Рисунок 1.5 Результаты проверок энергетического разрешения ΔЕ/Е КДО и ШО АРИЕС-Л



Рисунок 1.6 Результаты проверки массового разрешения М/АМ КДО и ШО АРИЕС-Л

Приложение 2. Циклограммы работы АРИЕС-Л

Nº	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.
1		Плавное включе	ение детектора				2
2	1	10-350 эВ, lin	энергоспектр	5	1	40,375	6,73
3	24	10-350 эВ, log	энергоспектр	5	1	40,375	6,73
4	2	10-500 эВ, lin	энергоспектр	5	1	40,375	6,73
5	25	10-500 эВ, log	энергоспектр	5	1	40,375	6,73
6	3	10-1000 эВ, lin	энергоспектр	5	1	40,375	6,73
7	26	10-1000 эВ, log	энергоспектр	5	1	40,375	6,73
8	4	10-1500 эВ, lin	энергоспектр	5	1	40,375	6,73
9	27	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	1	40,375	6,73
			энергомасс				
10	2	10-500 эВ, lin	спектр	10	1,5	56,375	18,79
			энергомасс				
11	25	10-500 эВ, log	спектр	10	1,5	56,375	18,79
12		Выключени	е прибора				
			Суммар	оное вре	емя работы прибора	а, минуты	93,4

Таблица 2.1 Циклограмма 1: Работа прибора при первом включении

Циклограмма предназначена для выполнения при первом включении прибора в режиме измерений после посадки КА на лунную поверхность. Измерения носят квалификационный характер и направлены на проверку работоспособности прибора после перелета. В процессе выполнения циклограммы осуществляются измерения энергетического и массового спектров в диапазоне энергий до 1500 эВ.



Рисунок 2.1 Проверка работы прибора по циклограмме первого включения.

N⁰	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.
1		Плавное включе	ение детектора				2
2	3	10-1000 эВ, lin	энергоспектр	5	1	40.38	6.73
3	3	10-1000 эВ, lin	энергоспектр	10	0.5	24.38	8.13
4	3	10-1000 эВ, lin	энергоспектр	15	0.25	16.38	8.19
5	26	10-1000 эВ, log	энергоспектр	5	1	40.38	6.73
6	26	10-1000 эВ, log	энергоспектр	10	0.5	24.38	8.13
7	26	10-1000 эВ, log	энергоспектр	15	0.25	16.38	8.19
8	5	10-2000 эВ, lin	энергоспектр	5	1	40.38	6.73
9	5	10-2000 эВ, lin	энергоспектр	10	0.5	24.38	8.13
10	5	10-2000 эВ, lin	энергоспектр	15	0.25	16.38	8.19
11	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	5	1	40.38	6.73
12	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	10	0.5	24.38	8.13
13	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	15	0.25	16.38	8.19
14		Выключени	е прибора				
			Суммар	оное вре	емя работы прибора	а, минуты	94.17

Таблица 2.2 Циклограмма 2: Работа прибора в диапазоне энергий до 2кэВ

Во время второго включения прибора проверяется работа прибора в режиме регистрации энергетического спектра в диапазоне энергий до 2кэВ. В циклограмме перебираются линейные и логарифмические таблицы, варьируется время прохода по таблицам.



Рисунок 2.2 Проверка работы прибора по циклограмме 2. Измерения энергетического спектра с энергиями до 2кэВ.

N⁰	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.
1		Плавное включе	ение детектора				2
2	3	10-1000 эВ, lin	энергоспектр	14	0,25	16,38	7,64
3	3	10-1000 эВ, lin	энергоспектр	17	0,125	12,38	7,01
4	5	10-2000 эВ, lin	энергоспектр	14	0,25	16,38	7,64
5	5	10-2000 эВ, lin	энергоспектр	17	0,125	12,38	7,01
6	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	14	0,25	16,38	7,64
7	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	17	0,125	12,38	7,01
8	16	10-3000 эВ, lin	энергоспектр	5	1	40.38	6,73
9	16	10-3000 эВ, lin	энергоспектр	9	0.5	24.38	7,31
10	16	10-3000 эВ, lin	энергоспектр	14	0.25	16.38	7,64
11	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	5	1	40.38	6,73
12	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	9	0.5	24.38	7,31
13	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	14	0.25	16.38	7,64
14		Выключени	е прибора				
			Суммар	оное вре	емя работы прибора	а, минуты	91,33

Таблица 2.3 Циклограмма 3 Работа прибора в диапазоне энергий до 3кэВ

Третья циклограмма обеспечивает работу прибора при измерении энергетического спектра в диапазоне до 3000 эВ. Количество проходов по каждой таблицы выбирается таким образом, чтобы имеющиеся в циклограмме измерения были бы примерно одинаковы по времени



Рисунок 2.3 Проверка работы прибора по циклограмме 3, измерения энергетического спектра частиц с энергиями до 3 кэВ

N⁰	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.	
1		Плавное включе	ение детектора				2	
2	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	5	1	40,38	6,73	
3	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	9	0,5	24,38	7,31	
4	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	14	0,25	16,38	7,64	
5	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	18	0,125	12,38	7,43	
6	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	5	1	40,38	6,73	
7	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	9	0,5	24,38	7,31	
8	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	14	0,25	16,38	7,64	
9	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	18	0,125	12,38	7,43	
10	32	10-4000 эВ, log	энергоспектр	5	1	40,38	6,73	
11	32	10-4000 эВ, log	энергоспектр	9	0,5	24,38	7,31	
12	32	10-4000 эВ, log	энергоспектр	14	0,25	16,38	7,64	
13	32	10-4000 эВ, log	энергоспектр	18	0,125	12,38	7,43	
14		Выключени	е прибора					
Суммарное время работы прибора, минуты 91,7								

Таблица 2.4 Циклограмма 4. Работа прибора в диапазоне энергий до 4 кэВ

Четвертая циклограмма работы прибора включает в себя работу по регистрации энегретического спектра в диапазоне энергий до 4 кэВ. Измерения проводятся в логарифмическом масштабе. Проверяется работа прибора при различных скоростях сканирования по энергиям.



Рисунок 2.4 Проверка работы прибора по циклограмме 4 – регистрация энергетического спектра в диапазоне энергий до 4 кэВ

N⁰	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.
1		Плавное включе	ение детектора				2
2	2	10-500 эВ, lin	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06
3	2	10-500 эВ, lin	масс-спектр	10	1	40,38	13,46
4	26	10-1000 эВ, log	энергоспектр	9	0,5	24,38	7,31
5	26	10-1000 эВ, log	энергоспектр	14	0,25	16,38	7,64
6	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	9	0,5	24,38	7,31
7	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	14	0,25	16,38	7,64
8	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	9	0,5	24,38	7,31
9	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	14	0,25	16,38	7,64
10	32	10-4000 эВ, log	энергоспектр	9	0,5	24,38	7,31
11	32	10-4000 эВ, log	энергоспектр	14	0,25	16,38	7,64
12	33	10-4500 эВ, log	энергоспектр	9	0,5	24,38	7,31
13	33	10-4500 эВ, log	энергоспектр	14	0,25	16,38	7,64
14		Выключени	е прибора				
			Суммар	оное вре	емя работы прибора	а, минуты	96,29

Таблица 2.5 Циклограмма 5. Работа прибора в диапазоне энергий до 4.5 кэВ

Пятая циклограмма включает в себя работы по регистрации энергомасс-спектра в диапазоне энергий до 500 эВ и регистрацию энергоспектров в диапазоне энергий до 4.5 кэВ.



Рисунок 2.5 Проверка функционирования прибора по циклограмме 5.

N⁰	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.	
1		Плавное включе	ение детектора				2	
2	1	10-350 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
3	1	10-350 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
4	1	10-350 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
5	74	10-350 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
6	1	10-350 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
7	147	10-350 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
8	2	10-500 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
9	2	10-500 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
10	2	10-500 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
11	75	10-500 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
12	2	10-500 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
13	148	10-500 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
14		Выключени	е прибора					
Суммарное время работы прибора, минуты 93.								

Таблица 2.6 Циклограмма 6. Регистрация энергомасс-спектра до 500 эВ

Циклограмма 6 предназначена для проверки функционирования прибора при регистрации энергомасс-спектра в диапазоне энергий до 500 эВ при работе по линейным таблицам. Циклограмма включает в себя чередование регистрации энергетического спектра и работу прибора по таблицам с высоким, средним и низким массовым разрешением М/ΔМ.



Рисунок 2.6 Проверка работы прибора по циклограмме 6. Чередование регистрации энергетического и массового спектров

№	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.		
1		Плавное включе	ение детектора				2		
2	24	10-350 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
3	24	10-350 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
4	24	10-350 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
5	97	10-350 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
6	24	10-350 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
7	170	10-350 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
8	25	10-500 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
9	25	10-500 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
10	25	10-500 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
11	98	10-500 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
12	25	10-500 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
13	171	10-500 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
14 Выключение прибора									
Суммарное время работы прибора, минуты 93.									

Таблица 2.7 Циклограмма 7 Регистрация энергомасс спектра до 500 эВ

Циклограмма 7 предназначена для проверки функционирования прибора при регистрации энергомасс-спектра в диапазоне энергий до 500 эВ при работе по логарифмическим таблицам. Циклограмма включает в себя чередование регистрации энергетического спектра и работу прибора по таблицам с высоким, средним и низким массовым разрешением М/ Δ М.



Рисунок 2.7 Проверка функционирования прибора по циклограмме 7. Чередование регистрации энергетического и массового спектров в логарифмическом масштабе.

N⁰	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.		
1		Плавное включе	ение детектора				2		
2	3	10-1000 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
3	3	10-1000 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
4	3	10-1000 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
5	76	10-1000 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
6	3	10-1000 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
7	149	10-1000 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
8	26	10-1000 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
9	26	10-1000 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
10	26	10-1000 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
11	99	10-1000 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
12	26	10-1000 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
13	172	10- <u>1000</u> эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
14 Выключение прибора									
Суммарное время работы прибора, минуты 93,0									

Таблица 2.8 Циклограмма 8. Регистрация энергомасс-спектра до 1кэВ

В процессе работы прибора по циклограмме 8 проверяется функционирование прибора при регистрации энергетического и массового спектров в диапазоне энергий до 1кэВ по линейным и логарифмическим таблицам с различным массовым разрешением



Рисунок 2.8 Проверка функционирования прибора по циклограмме 8.

N⁰	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.	
1		Плавное включе	ение детектора				2	
2	5	10-2000 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
3	5	10-2000 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
4	5	10-2000 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
5	78	10-2000 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
6	5	10-2000 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
7	151	10-2000 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
8	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
9	28	10-2000 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
10	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
11	101	10-2000 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
12	28	10-2000 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
13	174	10-2000 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
14		Выключени	е прибора					
Суммарное время работы прибора, минуты 93.								

Таблица 2.9 Циклограмма 9. Регистрация энергомасс-спектра до 2кэВ

Циклограмма 9 обеспечивает работу прибора по регистрации энергетических и массовых спектров в диапазоне энергий до 2 кэВ с различным массовым разрешением и позволяет регистрировать как ионы солнечного ветра, так и рассеянные и отраженные от реголита частицы.



Рисунок 2.9 Проверка функционирования прибора по циклограмме 9. Регистрация энергомасс спектров в диапазоне энергий до 2 кэВ.

N⁰	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.		
1		Плавное включе	ение детектора				2		
2	7	10-3000 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
3	7	10-3000 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
4	7	10-3000 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
5	80	10-3000 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
6	7	10-3000 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
7	153	10-3000 эВ, lin	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
8	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
9	30	10-3000 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
10	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
11	103	10-3000 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
12	30	10-3000 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73		
13	176	10-3000 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11		
14		Выключени	е прибора						
Суммарное время работы прибора, минуты 93									

Таблица 2.10 Циклограмма 10. Регистрация энергомасс-спектра до 3 кэВ

Циклограмма 10 предназначена для проверки функционирования прибора в режиме регистрации энергетического и массового спектров с различным разрешением в диапазоне энергий до 3 кэВ. Расширенный энергетический диапазон позволяет регистрировать как солнечный ветер, так и вторичные частицы.



Рисунок 2.10 Проверка работы прибора по циклограмме 10. Регистрация энергетического и массового спектров в диапазоне энергий до 3 кэВ

N⁰	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.	
1		Плавное включе	ение детектора				2	
2	1	10-350 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
3	1	10-350 эВ, lin	масс спектр	8	1	40,38	10,77	
4	1	10-350 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
5	74	10-350 эВ, lin	масс спектр	5	2	72,38	12,06	
6	1	10-350 эВ, lin	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
7	147	10-350 эВ, lin	масс спектр	4	3	104,38	13,92	
8	1	10-350 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
9	1	10-350 эВ, log	масс спектр	9	1	40,38	12,11	
10	1	10-350 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,37	
11	74	10-350 эВ, log	масс спектр	15	0,5	24,38	12,19	
12	1	10-350 эВ, log	энергоспектр	5	0,25	16,38	2,73	
13	147	10-350 эВ, log	масс спектр	20	0,25	16,38	10,92	
14		Выключени	е прибора					
Суммарное время работы прибора, минуты 92,2								

Таблица 2.11 Циклограмма 11. Регистрация энергомасс-спектра до 350 эВ

Циклограмма 11 позволяет провести проверку регистрации энергомасс-спектра в диапазоне энергий до 350 эВ по линейным и логарифмическим таблицам. При работе чередуются измерения энергетического и массового спектров с различными параметрами экспозиции и массового разрешения. Циклограмма направлена на регистрацию вторичных низкоэнергичных частиц с реголита Луны



Рисунок 2.11 Проверка работы прибора по циклограмме 11. Регистрация энергомассспектра в диапазоне энергий до 350 эВ

N⁰	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.	
1		Плавное включе	ение детектора				2	
2	38	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06	
3	55	300 эВ, neutral	const	7	1	40,38	9,42	
4	38	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06	
5	56	500 эВ, neutral	const	7	1	40,38	9,42	
6	38	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06	
7	57	700 эВ, neutral	const	7	1	40,38	9,42	
8	38	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06	
9	55	300 эВ, neutral	const	8	1	40,38	10,77	
10	38	10-1500 эВ, log	энергоспектр	8	1	40,38	10,77	
11	56	500 эВ, neutral	const	8	1	40,38	10,77	
12	38	10-1500 эВ, log	энергоспектр	8	1	40,38	10,77	
13	87	700 эВ, neutral	const	5	0,5	24,38	4,06	
14		Выключени	е прибора					
Суммарное время работы прибора, минуты 95,								

Таблица 2.12 Циклограмма 12. Первое включение конвертера нейтральных частиц

Циклограмма предназначена для проведения измерений потока нейтральных атомов с поверхности Луны и чередует регистрацию заряженных частиц с работой конвертера нейтральных частиц. При регистрации нейтральных частиц в режиме const подается фиксированный потенциал на элементы МЭО прибора и фиксируется счет детектора.



Рисунок 2.12 Проверка функционирования прибора по циклограмме 12. Работа с конвертером нейтральных частиц.

№	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.		
1		Плавное включе	ение детектора				2		
2	38	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06		
3	55	300 эВ, neutral	const	7	1	40,38	9,42		
4	38	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06		
5	56	500 эВ, neutral	const	7	1	40,38	9,42		
6	38	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06		
7	62	10-500 эВ, lin	энергоспектр с КН	8	1	40,38	10,77		
8	63	10-800 эВ, lin	энергоспектр с КН	8	1	40,38	10,77		
9	64	10-1000 эВ, lin	энергоспектр с КН	8	1	40,38	10,77		
			нергоспектр с						
10	65	10-1250 эВ, lin	КН	8	1	40,38	10,77		
11	38	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06		
13		Выключение прибора							
Суммарное время работы прибора, минуты									

Таблица 2.13 Циклограмма 13. Работа с конвертером нейтральных частиц

Циклограмма 13 обеспечивает чередование регистрации энергетического спектра и работу с конвертером нейтральных частиц. Также в циклограмме проверяется работа прибора при синхронном изменении потенциала на МЭО и КН. Такой режим работы позволяет одновременно регистрировать энергетический спектр заряженных частиц и проводить мониторинг потока нейтральных атомов.



Рисунок 2.13 Проверка работы прибора по циклограмме 13. Регистрация энергетического спектра частиц и потока нейтральных атомов.

№	Номер таблицы	Диапазон измерений, тип таблицы	Тип измерений	Число проходов	Длительность ступеньки, сек.	Время одного спектра, сек	Общее время, мин.	
1		Плавное включе	ение детектора				2	
2	221	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06	
			const, macc-					
3	201	300 эВ, neutral	спектр	8	1	40,38	10,77	
4	221	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06	
			const, масс-					
5	201	500 эВ, neutral	спектр	8	1	40,38	10,77	
6	221	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06	
			const, масс-					
7	201	700 эВ, neutral	спектр	8	1	40,38	10,77	
8	221	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06	
			const, масс-					
9	202	300 эВ, neutral	спектр	8	1	40,38	10,77	
10	221	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06	
			масс-спектр с					
11	213	80-500 эВ, lin	КН	8	1	40,38	10,77	
12	221	10-1500 эВ, log	энергоспектр	5	0,5	24,38	4,06	
			масс-спектр с					
13	213	80-500 эВ, lin	КН	8	1	40,38	10,77	
14 Выключение прибора								
Суммарное время работы прибора, минуты								

Таблица 2.14 Циклограмма 14 Измерения нейтральных атомов и энерго-спектра ионов

Циклограмма 14 обеспечивает чередование измерений энергоспектра по 64-х разрядным таблицам и регистрацию нейтральных частиц с работой времяпролетной схемы прибора.



Рисунок 2.14 Проверка рботы прибора по циклограмме 14. Регистрация энергетического спектра ионов и массового состава нейтральных атомов.