

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ НАСТРОЕК И КАЛИБРОВОК ИОННЫХ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ

© 2019 г. Д. А. Моисеенко^{a,*}, О. Л. Вайсберг^a, А. Ю. Шестаков^a, Р. Н. Журавлев^a,
С. Д. Шувалов^a, М. В. Митюрин^b, П. П. Моисеев^b, И. И. Нечушкин^b,
Е. И. Родькин^b, А. Д. Васильев^b, В. В. Летуновский^b

^a Институт космических исследований РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
^b ООО “НПП Астрон-Электроника”, Россия, Орел

* e-mail: moiseenko-da@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.08.2018 г.

После доработки 12.09.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Приводятся характеристики аппаратно-программного комплекса для лабораторных настроек и калибровок плазменных энергомасс-анализаторов, создаваемых в рамках российских и международных космических миссий. Описывается принцип функционирования прибора АРИЕС-Л и приводятся результаты функциональных испытаний образцов приборов, полученные с использованием аппаратно-программного комплекса.

DOI: 10.1134/S0032816219020265

ВВЕДЕНИЕ

Аппаратно-программный комплекс (а.п.к.) разработан для лабораторных испытаний плазменных энергомасс-анализаторов и позволяет проводить работы по определению аналитических характеристик прибора, таких как: проверки полей зрения и пространственного разрешения прибора; детектирование заряженных частиц в полном диапазоне энергий; определение энергетического ($\Delta E/E$) и массового ($M/\Delta M$) разрешения; проверка функции регистрации нейтральных атомов. С использованием а.п.к. выполнены функциональные испытания прибора АРИЕС-Л, создаваемого в рамках космической миссии “Луна-Глоб”. Доработанное программное обеспечение а.п.к. использовалось при испытаниях прототипа компактного анализатора ПИКА, разрабатываемого в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 17-72-20134).

Прибор АРИЕС-Л – ионный энерго-масс-спектрометр с полем зрения, близким к 2π , и возможностью детектирования потоков нейтральных атомов. Прибор предназначен для размещения на посадочных и орбитальных космических аппаратах. Научные задачи прибора направлены на исследование реголита методами вторичной ионной масс-спектрометрии, изучение процес-

сов взаимодействия солнечного ветра с поверхностью Луны.

Основные характеристики прибора: масса 2.5 кг; габариты 190 × 186 × 156 мм; энергопотребление прибора 3–7 Вт в зависимости от режима работы; энергетический диапазон 10–5000 эВ; энергетическое разрешение не хуже 15%; массовый диапазон 1–100 а.е.м.; массовое разрешение не хуже 30.

ПРИНЦИП ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ 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. Диапазон регистрируемых энергий заряженных частиц – от 10 эВ до 5000 эВ [1]. Структура прибора приведена на рис. 1.

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

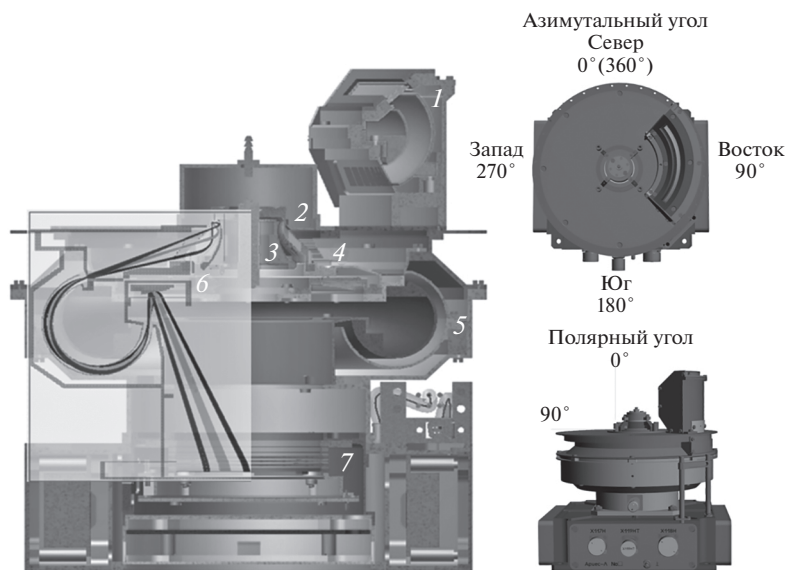


Рис. 1. Структура прибора АРИЕС-Л и система координат, применявшаяся в процессе проведения функциональных испытаний. 1 – конвертер нейтральных частиц; 2 – входное окно модуля электронной оптики; 3 – зеркало М1; 4 – затвор времяпролетной схемы; 5 – электростатический анализатор; 6 – зеркало М2; 7 – координатно-чувствительный детектор на основе микроканальных пластин.

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 М2 (6). М2 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 [2].

Для регистрации частиц в приборе используется координатно-чувствительный детектор на основе микроканальных пластин с анодом типа клинья-полосы. Конфигурация детектора и анода приведены на рис. 2. 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.

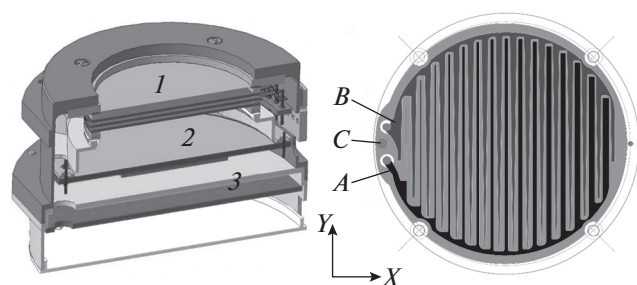


Рис. 2. Структура координатно-чувствительного детектора прибора АРИЕС-Л и анода, используемого в детекторе. 1 – шевронная сборка из трех микроканальных пластин; 2 – анод; 3 – электронные платы с зарядочувствительными элементами. *A*, *B* и *C* – сегменты анода.

Для определения массового состава потока частиц используется времяпролетная схема прибора. Для этого используется затвор 4 (рис. 1), расположенный за зеркалом М1. Затвор представляет собой комбинацию параллельных электродов, на которые подается потенциал разной полярности. Когда затвор закрыт (на его электроды подаются разнополярные потенциалы), частицы, вышедшие из зеркала М1, 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, от-

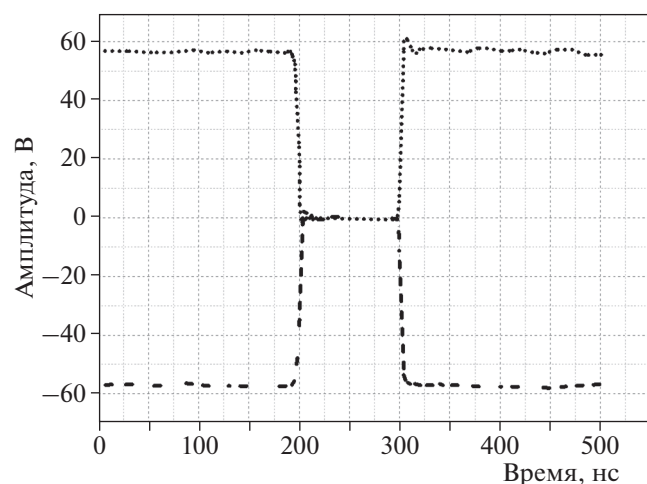


Рис. 3. Изменение потенциала на электродах затвора при работе прибора в режиме регистрации массового спектра. Ступенчатое изменение потенциала позволяет ионам пройти через затвор.

считываемое 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 рис. 3.

Принцип действия конвертера нейтральных частиц основан на ионизации нейтральных атомов при их взаимодействии с поверхностью электрода-ионизатора [3]. Структура конвертера показана на рис. 4. Входное окно конвертера нейтралов оснащено антиионной 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.

СОСТАВ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

В состав а.п.к. входят вакуумная камера с системой откачки, источники ионов и нейтральных атомов, датчик контроля потока ионов, лабораторные высоковольтные и низковольтные источники питания, манипулятор для размещения образца прибора под потоком ионов, система сбора и обработки информации. Структура а.п.к. приведена на рис. 5.

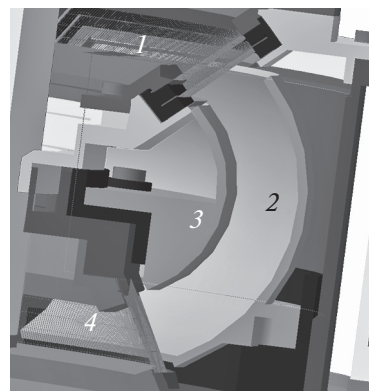


Рис. 4. Структура конвертера нейтральных частиц. 1 — входное окно с системой сеток, не пропускающих ионы; 2 — электрод-ионизатор; 3 — корректирующий электрод; 4 — выходное окно.

Для размещения прибора АРИЕС внутри вакуумной камеры используется манипулятор, обеспечивающий вращение прибора под потоком ионов в двух плоскостях. Манипулятор представляет собой поворотный столик с посадочными местами для крепления прибора, размещенный на качелях, обеспечивающих наклон относительно вертикальной оси. Манипулятор осуществляет поворот прибора под ионным пучком на 360° по азимутальному углу и наклон до 90° по полярному углу. Точность задания положения прибора не хуже 0.5° для каждого из углов, точность определения положения прибора не хуже 0.1° . Манипулятор предусматривает управление с компьютера.

Для облучения испытываемого прибора потоком заряженных частиц используется ионный источник с ионизацией 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 (д.к.п.), представляющий собой цилиндр Фарадея с восьмисегментным анодом и усилителями тока (рис. 6). Д.к.п. 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%.

С использованием д.к.п. 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 рис. 7. Проведенные испытания показали, что ΔE

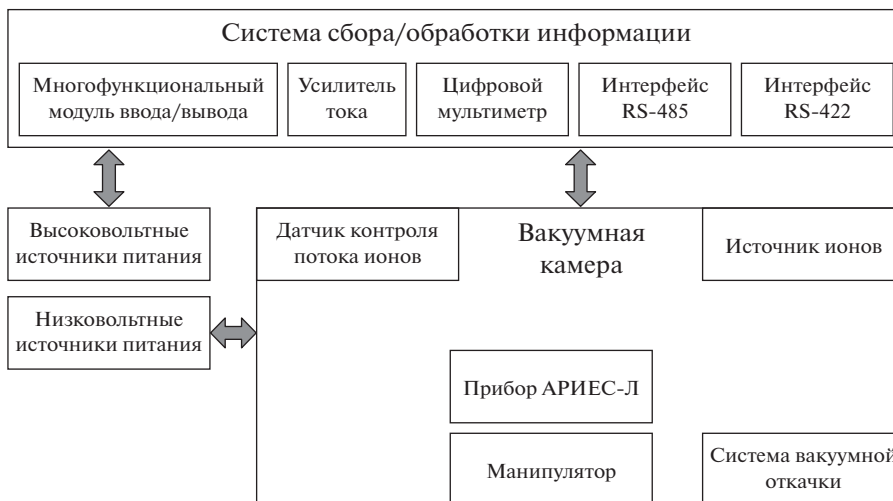


Рис. 5. Структура аппаратно-программного комплекса.

потока ионов зависит от энергии. Для энергий ионов больше 700 эВ $\Delta E \leq 2\%$. Стабильность потока ионов после прогрева источника лучше 3%.

Для проверок и настроек узла конвертера нейтральных атомов был разработан источник нейтральных атомов (и.н.), представляющий собой систему отклоняющих и запирающих электродов и пластину-нейтрализатор. Структура и.н. приведена на рис. 8. Принцип действия источника нейтральных частиц основан на процессе нейтрализации ионов при взаимодействии с поверхностью мишени-нейтрализатора [4]. Для получения потока нейтральных частиц и.н. 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 мишени-нейтрализатора. Отраженные и вторичные заряженные и нейтральные частицы, образованные в результате взаимодействия первичного потока ионов с мишенью-нейтрализатором, движутся в сторону запирающего электрода и выход-

ного окна. Для получения на выходе и.н. 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 варьироваться в зависимости от задач эксперимента. Для работ с образцами прибора АРИЕС-Л, разрабатываемых в рамках миссии “Луна-Глоб”, использовались пластина шлифованного вольфрама и пластина с золотым покрытием. Конструкция и.н. позволяет изменять угол падения ионов на пластину-нейтрализатор в диапазоне от 1° до 10° к плоскости пластины. В такой конфигурации и.н. обеспечивает поток нейтральных атомов с плотностью до 900000 частиц/(см² с).

Для мониторинга и управления составными частями а.п.к. используется система сбора и обработки информации, собранная на основе шасси National Instruments PXI-1075 с контроллером NI PXI-8133. Система оснащена также модулями DAQ PXI-6259 (многофункциональным модулем, содержащим многоканальные аналого-цифровые и цифроаналоговые 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.

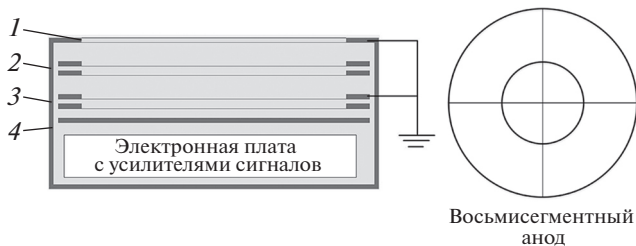


Рис. 6. Структура датчика контроля потока. 1 – входное окно д.к.п.; 2 – двойная аналитическая сетка; 3 – супрессорная антиэлектронная сетка; 4 – восьмисегментный анод. Справа показана конфигурация коллекторов используемого в д.к.п. анода.

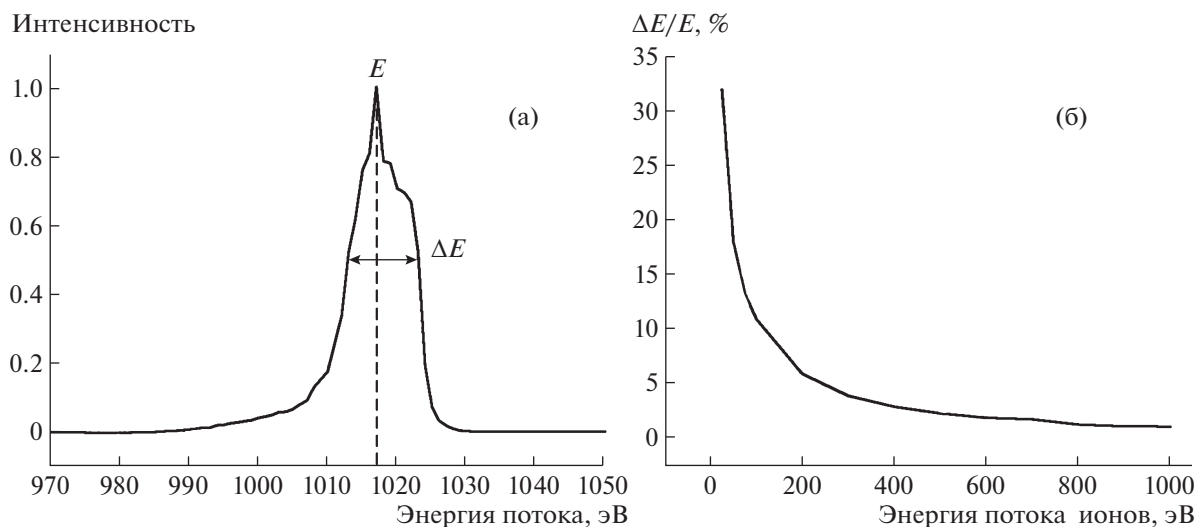


Рис. 7. Пример оценки $\Delta E/E$ (а) и зависимость $\Delta E/E$ (б) от энергии потока ионов.

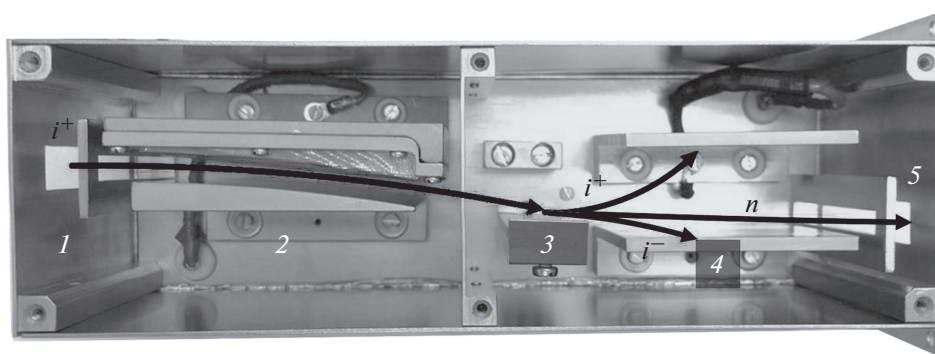


Рис. 8. Структура источника нейтральных атомов. 1 – входная диафрагма; 2 – электростатический дефлектор; 3 – пластина-нейтрализатор; 4 – запирающие электроды; 5 – выходная диафрагма. Линиями показаны траектории движения частиц в и.н.

Усилитель тока PXI-4022 в паре с мультиметром PXI-4065 используется для контроля ионного тока при работе с конвертером нейтральных частиц для прогнозирования ожидаемого потока нейтральных атомов и также может быть использован для мониторинга параметров работы ионного источника в тех случаях, когда д.к.п. не может быть применен. Отдельно мультиметр PXI-4065 используется при калибровках внутренних высоковольтных источников питания испытываемых образцов 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 а.п.к. и автоматизации набора проверок, выполняемых в процессе испытаний образцов разрабатываемых приборов, было разработано специальное программное обеспечение.

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 формиру-

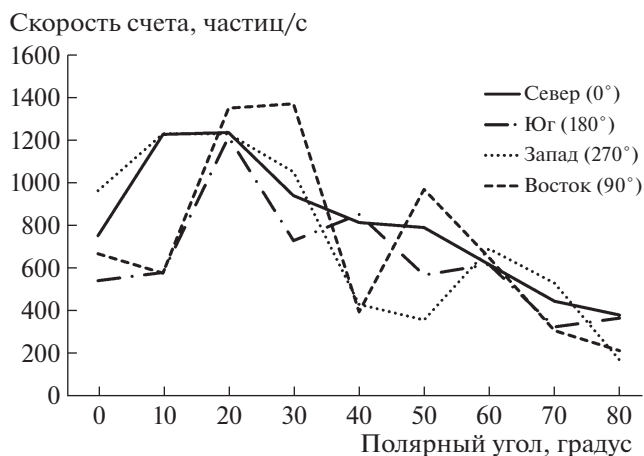


Рис. 9. Относительное пропускание модуля электронной оптики прибора АРИЕС-Л для четырех азимутальных углов.

ется 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.

Описанный программный комплекс успешно применялся для настроек и проведения функциональных испытаний образцов плазменного энергомасс-спектрометра АРИЕС-Л, создаваемого в рамках проекта “Луна-Глоб”.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ПРИБОРА

Функциональные испытания включали в себя:

- определение относительного пропускания модуля электронной оптики (м.э.о.) 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 – E и ΔE ;
- проверку массового разрешения для выбранных азимутальных и полярных углов;
- проверку работы конвертера нейтральных частиц.

Оценка относительного пропускания

Относительное пропускание прибора – зависимость скорости счета на детекторе прибора от

полярного и азимутального углов. Данная характеристика позволяет сделать выводы о чувствительности прибора при регистрации частиц, попавших во входное окно с разных углов. Оценка относительного пропускания проводилась на четырех азимутальных углах (-90° , 0° , 90° , 180°) для диапазона полярных углов от 0° до 90° с шагом 10° . Проверка проводилась на моноэнергетическом мононаправленном пучке ионов при энергии 1 кэВ. Результаты измерений относительного пропускания приведены на рис. 9. Приведенные данные получены для одинаковой плотности потока ионов для всех положений прибора. Наблюдаемые различия в пропускании м.э.о. на различных азимутальных углах связаны с некоторой асимметрией расположения его элементов друг относительно друга, связанной с погрешностями при изготовлении деталей м.э.о. Падение эффективности регистрации частиц в зависимости от полярного угла связано с особенностями конструкции м.э.о. и соответствуют компьютерной модели 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-Глоб” 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 рис. 10. 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.

Оценка разрешения по полярному углу

Согласно техническим требованиям угловое разрешение прибора по полярному углу должно быть не хуже 30° . Оценка разрешения по полярному углу проводилась 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 рис. 11. Проведенные испытания показали, что разрешение штатного образца прибора по полярному углу для каждого азимута не хуже 30° , что соответствует предъявляемым требованиям.

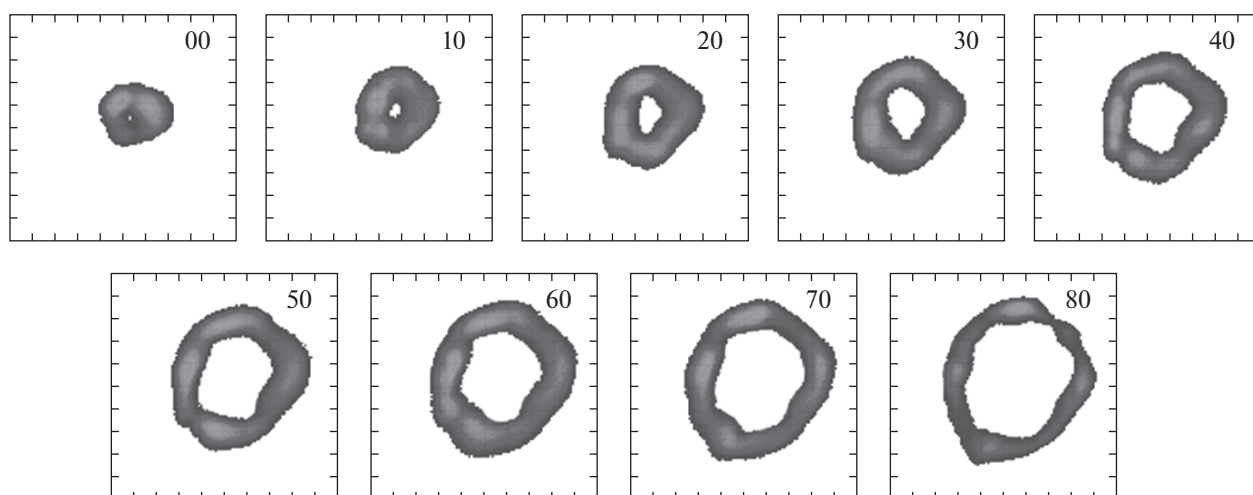


Рис. 10. Распределения потоков частиц на координатно-чувствительном детекторе прибора АРИЕС при выполнении проверки полей зрения прибора и соответствуют облучению прибора с фиксированного указанного полярного угла и сумме 36 азимутальных углов с шагом 10° .

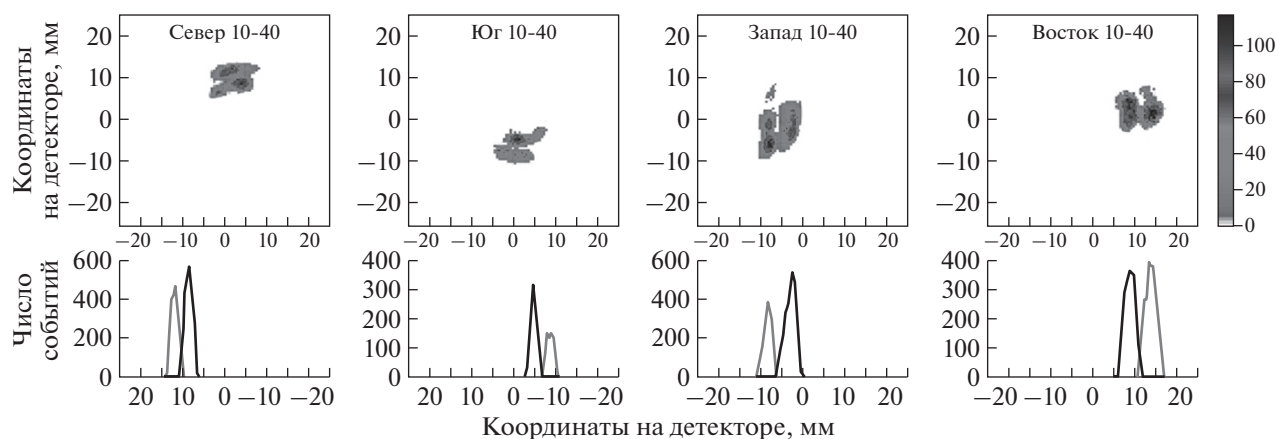


Рис. 11. Измерения, использованные для оценки разрешения м.э.о. по полярному углу для четырех азимутов для полярных углов 10° и 40° . Сверху показаны изображения потоков ионов на детекторе прибора, снизу – профили этих изображений.

Оценка 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 рис. 12. Анализ пространственных распределений частиц на детекторе прибора показал, что разрешение по азимутальному углу для испытываемого образца м.э.о. не хуже 40° , что удовлетворяет требованиям программы функциональных испытаний.

Оценка разрешения по энергии $\Delta E/E$

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 на детекторе от энергии потока ионов. Проведенные испытания показали, что для испытываемого образца прибора величина $\Delta E/E$ не превышает 11%, что соответствует предъявляемым к прибору техническим требованиям. Результаты измерений $\Delta E/E$ приведены на рис. 13.

Оценка массового разрешения

Оценка массового разрешения проводилась для четырех азимутальных углов (север, восток,

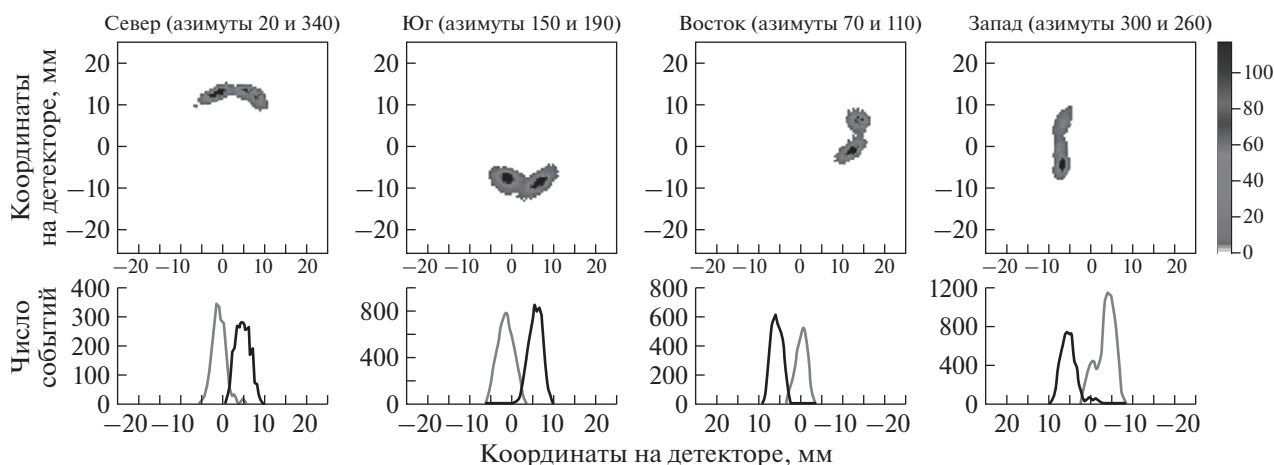


Рис. 12. Определение разрешения по азимутальному углу по изображениям на детекторе, полученным для полярного угла 40° на азимутальных углах $20^\circ, 340^\circ; 150^\circ, 190^\circ; 70^\circ, 110^\circ; 300^\circ, 260^\circ$. Сверху показаны изображения потоков ионов на детекторе прибора, снизу – профили этих изображений.

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 рис. 14.

Согласно требованиям к прибору величина $M/\Delta M$ 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 составляет от 30 до 79 в зависимости от полярного и азимутального углов прибора (рис. 15).

Проверка работоспособности прибора в диапазоне энергий от 0.15 до 4.5 кэВ

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 возможностях прибора проверка проводилась в расширенном энергетическом диапазоне – от 50 до 5000 эВ. Нижний предел энергий обусловлен ограничениями, связанными с параметрами работы ионного источника. Лабораторные тесты показывают, что

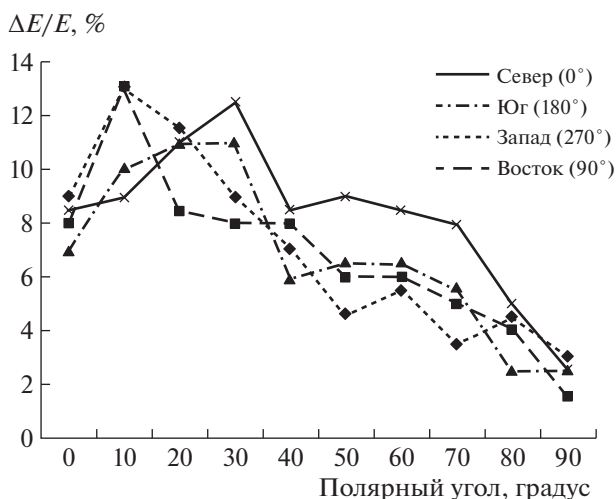


Рис. 13. Зависимость величины $\Delta E/E$ от полярного угла для четырех азимутов.

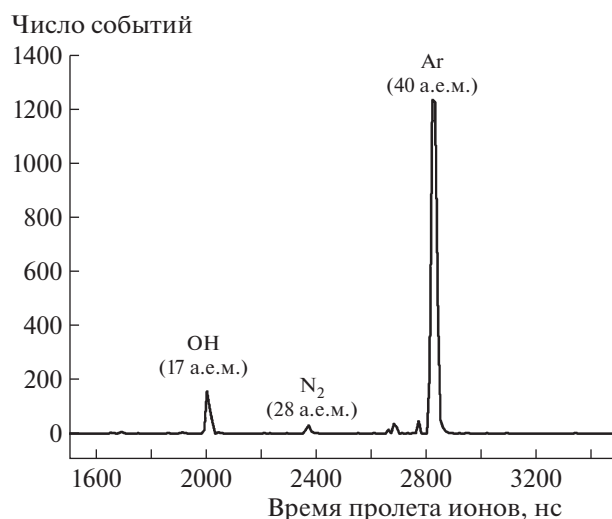


Рис. 14. Пример времяпролетного спектра для частиц с энергией 1 кэВ, северный азимут.

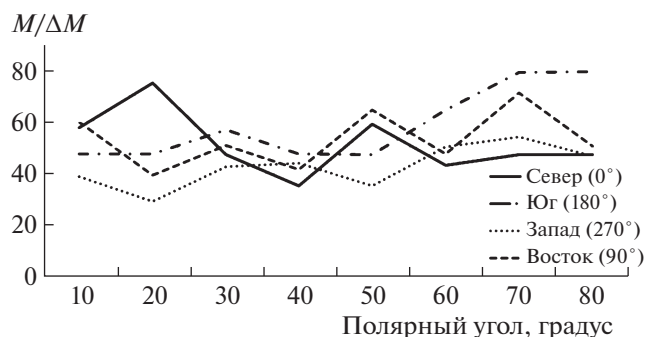


Рис. 15. Зависимость $M/\Delta M$ от полярного угла для четырех азимутов при энергии 1 кэВ.

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.

Дополнительно было проверено функционирование прибора в заявленном энергетическом диапазоне в режиме регистрации энергетического спектра. При работе в данном режиме прибор автоматически изменяет потенциал на элементах м.э.о., осуществляя сканирование в заданном энергетическом диапазоне. Для проведения данной проверки сначала устанавливалось требуемое значение энергии ионов, затем осуществлялось сканирование этого потока испытываемым прибором. Примеры полученных энергетических спектров приведены на рис. 16.

Проверка функционирования конвертера нейтральных частиц

При проверке конвертера нейтральных частиц прибор был размещен таким образом, чтобы кроме регистрации нейтральных атомов было возможно и детектирование потока первичных ионов из ионного источника и ионов, рассеянных на стенках вакуумной камеры. В процессе проверки режим работы источника нейтралов обеспечивал плотность потока нейтральных частиц ~ 700000 частиц/(см²/с). Площадь освещаемого нейтральными атомами окна конвертера ~ 1.4 см². Скорость счета на детекторе составила 19 событий/с (было накоплено 10168 событий за 528 с).

Таким образом, относительная эффективность системы конвертера нейтральных частиц в связке с модулем электронной оптики (отношение между скоростью счета на детекторе прибора к плотности потока частиц на входе в прибор, ча-

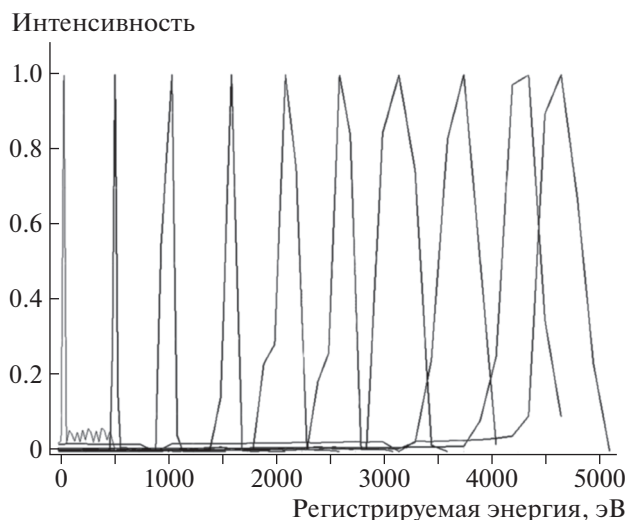


Рис. 16. Регистрация потоков заряженных частиц при работе прибора в режиме регистрации энергетического спектра.

стиц/(см²/с)), составила $\sim 2 \cdot 10^{-7}$. Примеры распределений потока ионов из конвертера нейтральных частиц, зарегистрированных прибором, приведены на рис. 17.

Прибор АРИЕС-Л прошел полный объем проверок, предусмотренный программой функциональных испытаний. Сравнение фактических значений проверяемых параметров с требованиями функциональных испытаний приведено в таблице 1.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Используемое в составе а.п.к. программное обеспечение после ряда доработок было применено для определения основных параметров прототипа электронно-оптической схемы плазменного ионного компактного анализатора ПИКА, разрабатываемого в рамках гранта РФФИ № 17-72-20134 и предназначенного для мониторинга параметров солнечного ветра. Структура прототипа прибора ПИКА и результаты проверки его функционирования приведены на рис. 18. Испытываемый прототип включал в себя фильтр Вина 1, обеспечивающий селекцию ионов по скоростям, электростатический анализатор 2 и детектор 3 на основе вторично-электронного умножителя ВЭУ-6. Проверки заключались в подборе рабочих потенциалов для электростатического анализатора и фильтра Вина, определении энергетического разрешения электростатического анализатора и проверке

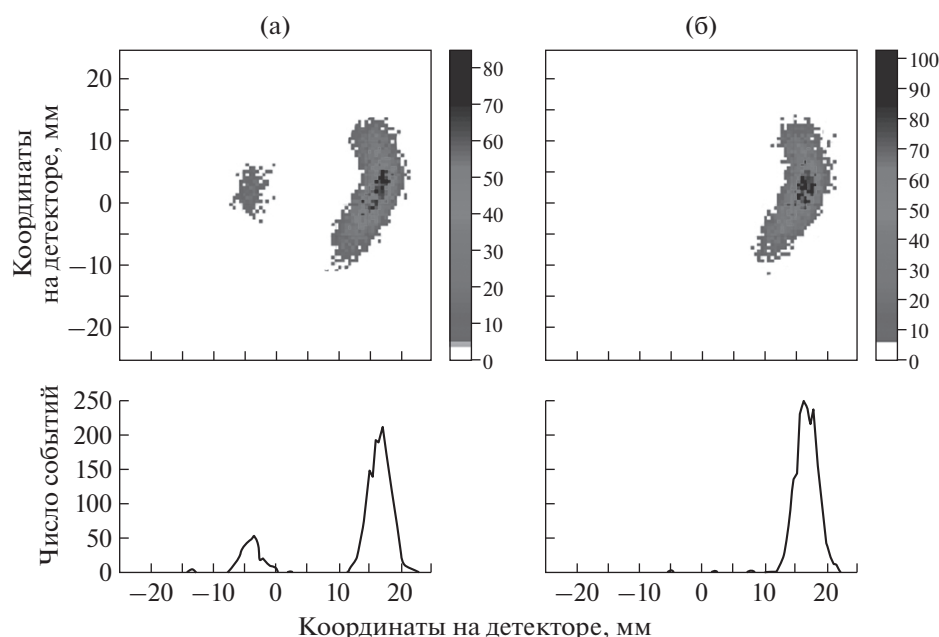


Рис. 17. Распределения потоков частиц на детекторе, полученные при работе с конвертером нейтральных частиц: **а** – одновременная регистрация первичных частиц из источника ионов и нейтралов из конвертера нейтральных частиц, **б** – регистрация потока нейтральных атомов без мониторинга первичного ионного потока.

работоспособности всего электронно-оптического тракта прототипа прибора при регистрации массового спектра заряженных частиц.

Энергетическое разрешение $\Delta E/E$ проверялось для фиксированного потенциала на обкладках электростатического анализатора при изменяемой с шагом 10 эВ энергией источника ионов и составила 5%.

Выполненные проверки позволили показать работоспособность предлагаемой электронно-оптической схемы прибора, получить навык ра-

боты с приборами подобного типа и провести адаптацию программного обеспечения для выполнения настроек и обработок создаваемых лабораторных прототипов приборов на аналогичных рабочих местах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный аппаратно-программный комплекс предназначен для настроек, обработок и калибровок в лабораторных условиях образцов плазменных энерго-масс спектрометров и детек-

Таблица 1. Соответствие требований программы функциональных испытаний актуальным параметрам прибора

Проверяемый параметр	Требуемое значение	По результатам испытаний
Диапазон углов зрения по полярному углу, градус	0–60	0–80
Разрешение по полярному углу, градус	Не хуже 30	30
Разрешение по азимутальному углу, градус	Не хуже 60	40
Энергетическое разрешение $\Delta E/E$	Не хуже 15%	От 3 до 13% в зависимости от полярного угла
Разрешение по массе $M/\Delta M$	Не менее 15 для 40 а.е.м. (на энергии 1 кэВ)	>30
Функционирование в полном энергетическом диапазоне	150–4500 эВ	10–5000 эВ*
Регистрация нейтральных частиц	Да	Да

*На потоке ионов проверка выполнена для энергий 50–5000 эВ.

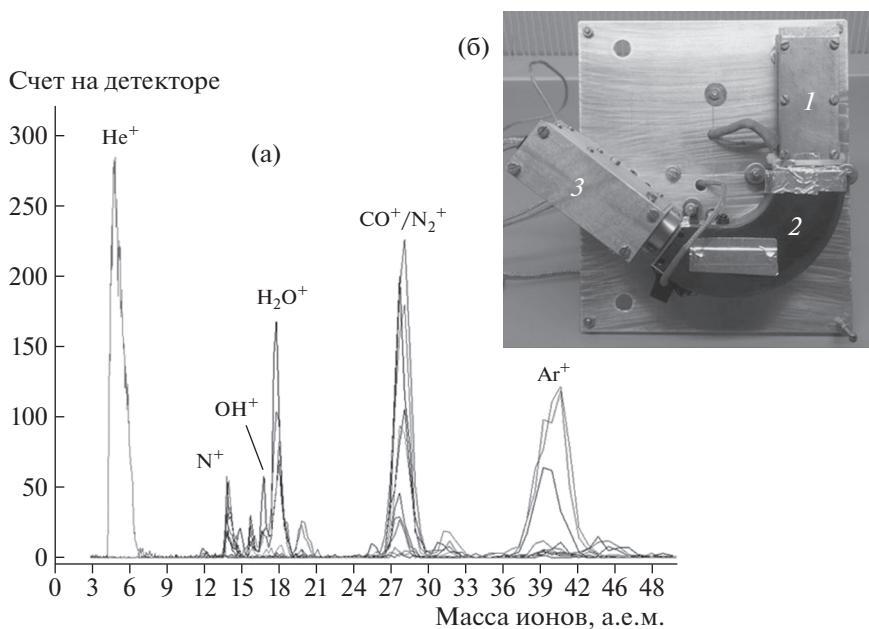


Рис. 18. а — комбинированный массовый спектр частиц, полученный при работе на остаточном газе и с напуском различных рабочих газов (гелий, углекислота, аргон); б — лабораторный прототип электронно-оптической схемы прибора ПИКА для регистрации параметров солнечного ветра.

торов нейтральных атомов, создаваемых для космических миссий. А.п.к. успешно использован для выполнения работ по настройкам и отработкам образцов приборов в рамках лунных миссий Роскосмоса. Функциональные испытания прибора АРИЕС-Л, выполненные с использованием данного а.п.к., показали, что параметры функционирования прибора соответствуют заявленным и позволяют решать поставленные научные задачи. С помощью модификации разработанного программного обеспечения были выполнены работы в части определения характеристик лабораторных прототипов приборов для мониторинга солнечного ветра, создаваемых за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-72-20134).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vaisberg O., Berthellier J.-J., Moore T., Avakov L., Leblanc F., Moiseev P., Moiseenko D., Becker J., Collier M., Laky G., Keller J., Koynash G., Lichtenegger H., Leibov A. et al. // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2016. V. 121. P. 11750. doi 10.1002/2016JA022568
2. Вайсберг О.Л., Аванов Л.А., Лейбов А.В. // *Космич. исслед.* 2005. Т. 43. № 5. С. 390.
3. Los J., Geerlings J.J.C. // *Phys. Reports*. 1990. V. 190(3). P. 133. doi 10.1016/0370-1573(90)90104-A
4. Wieser M., Wurz P. // *Meas. Sci. Technol.* 2005. V. 16. P. 2511. doi 10.1088/0957-0233/16/12/016