

УДК 523

ШИРОКОУГОЛЬНЫЙ ИОННЫЙ ЭНЕРГО-МАСС-АНАЛИЗАТОР АРИЕС-Л

© 2021 г. О. Л. Вайсберг^а, Р. Н. Журавлев^а, Д. А. Моисеенко^{а, *}, А. Ю. Шестаков^а,
С. Д. Шувалов^а, П. П. Моисеев^б, М. В. Митюрин^б, И. И. Нечушкин^б, А. Д. Васильев^б,
Е. И. Родькин^б, В. В. Летуновский^б

^аИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^бООО “НПП Астрон-Электроника”, Орел, Россия

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

Поступила в редакцию 02.11.2020 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 07.07.2021 г.

АРИЕС-Л — широкоугольный ионный энерго-масс-анализатор, обеспечивающий измерения параметров ионов в диапазоне энергий от 10 до 5000 эВ, а также позволяющий регистрировать поток нейтральных атомов с реголита Луны. Отличительной особенностью прибора является возможность одномоментной регистрации ионов выбранной энергии в поле зрения, близком к 2π. В рамках миссии Луна-25 задачами ионного энерго-масс-анализатора АРИЕС-Л являются изучение взаимодействия солнечного ветра с реголитом, исследования реголита методом вторичной ионной масс-спектрометрии и определение потока нейтральных атомов из реголита, вызванного 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.

Ключевые слова: солнечный ветер, вторичная ионная масс-спектрометрия, ионные энерго-масс-анализаторы, нейтральные атомы

DOI: 10.31857/S0320930X21060116

ВВЕДЕНИЕ

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 физико-химических свойств лунного полярного реголита (Казмерчук и др., 2016). В рамках данной миссии ионный энерго-масс-анализатор АРИЕС-Л позволит получить данные для исследования процессов взаимодействия солнечного ветра с реголитом (Lue и др., 2018), исследования реголита методом вторичной ионной масс-спектрометрии (Johnson, Baragiola, 1991), определения потока нейтральных атомов из реголита под воздействием заряженных частиц.

Основными источниками нейтральных атомов на Луне являются воздействие фотонов солнечного излучения на реголит (Yakshinskiy, Madey, 1999), микрометеоритная активность (Colaprete и др., 2015) и рассеяние протонов солнечного ветра (Dukes, Johnson, 2017; Futaana и др., 2006). Принцип работы конвертера нейтральных частиц, установленного на приборе АРИЕС-Л, основан на эффекте ионизации частиц в результате взаимодействия с мишенью-ионизатором (Sigmund, 1969), 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 дает возможность 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 позво-

лит проводить измерения в магнитосферной плазме.

В работе описываются принципы функционирования прибора и результаты лабораторных работ и испытаний конструкторско-доводочного и штатного образцов (КДО и ШО) прибора.

КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА

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 , а с другой, — выполнять массовый анализ потока частиц. Диапазон регистрируемых энергий заряженных частиц — от 10 до 5000 эВ. Отличительной особенностью прибора АРИЕС-Л является его электронно-оптическая схема, обеспечивающая одномоментную регистрацию заряженных частиц заданной энергии в поле зрения, близком к 2π (Vaisberg и др., 2016). Структура прибора приведена на рис. 1. Конструктивно прибор выполнен в виде моноблока и имеет габариты $190 \times 186 \times 165$ мм. Масса прибора составляет 2.5 кг.

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 (Моисеенко, 2019а).

Тороидальный электростатический анализатор служит для выделения узкого 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 на рис. 1). 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.

Для регистрации частиц в приборе используется координатно-чувствительный детектор на основе микроканальных пластин (МКП) с анодом типа клинья-полосы. Конфигурация расположения детектора и анода приведена на рис. 2. Анод состоит из электродов, имеющих форму клиньев, полос и полос с вырезанным клином, которые объединены в три группы: А, В и С. Ширина полос линейно изменяется с изменением координат X и Y . Отношение зарядов, регистрируе-

мых 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 (Martin и др., 1981).

Потенциал, подаваемый на сборку микроканальных пластин, может корректироваться для потенциала выполняется по результатам анализа амплитудных распределений сигналов от частиц, зафиксированных детектором. Для штатного образца прибора на момент завершения настроек и калибровок рабочий потенциал на детекторе составляет 2500 В. Электроника прибора обеспечивает оптимального режима работы детектора. Решение о корректировке рабочего обеспечивает повышение рабочего потенциала до 3000 В.

Использование координатно-чувствительного детектора на основе микроканальных пластин накладывает дополнительные требования к защите от засветки ультрафиолетовым излучением. С этой точки зрения используемая электронно-оптическая схема прибора имеет ряд преимуществ: узкая (0.12 мм) входная кольцевая диафрагма, отражения на зеркалах М1 и М2, диафрагмы на входе и выходе электростатического анализатора и основное преимущество — использование в приборе тороидального электростатического анализатора с углом раствора более 200° , обеспечивающего многократное переотражение светового потока на его обкладках. Таким образом, используемая в приборе электронно-оптическая схема дает надежную защиту от ультрафиолетового излучения.

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, 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 рис. 3.

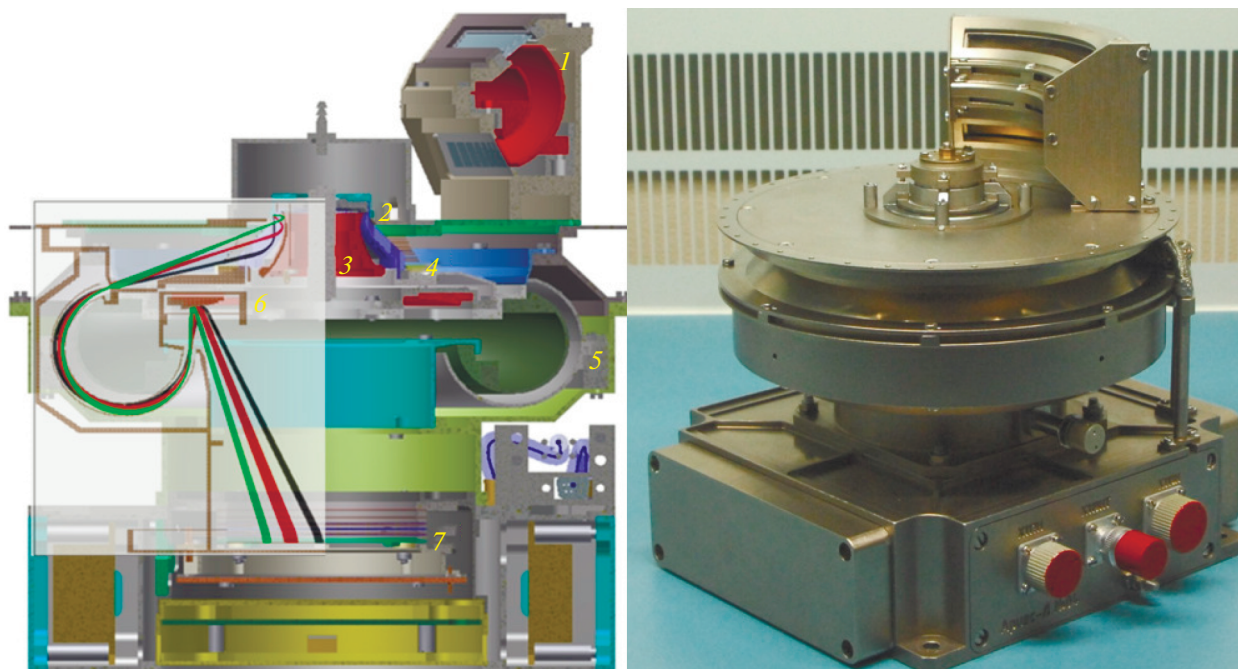


Рис. 1. Структура прибора АРИЕС-Л (слева) и его внешний вид (справа). 1 — конвертер нейтральных частиц; 2 — входное окно модуля электронной оптики; 3 — зеркало М1; 4 — затвор времяпролетной схемы; 5 — электростатический анализатор; 6 — зеркало М2; 7 — координатно-чувствительный детектор на основе микроканальных пластин.

Принцип действия конвертера нейтральных частиц основан на ионизации нейтральных атомов при их взаимодействии с поверхностью электрода-ионизатора (Los, Geerling, 1990). Структура конвертера показана на рис. 4. 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 (МЭО) и регистрируются

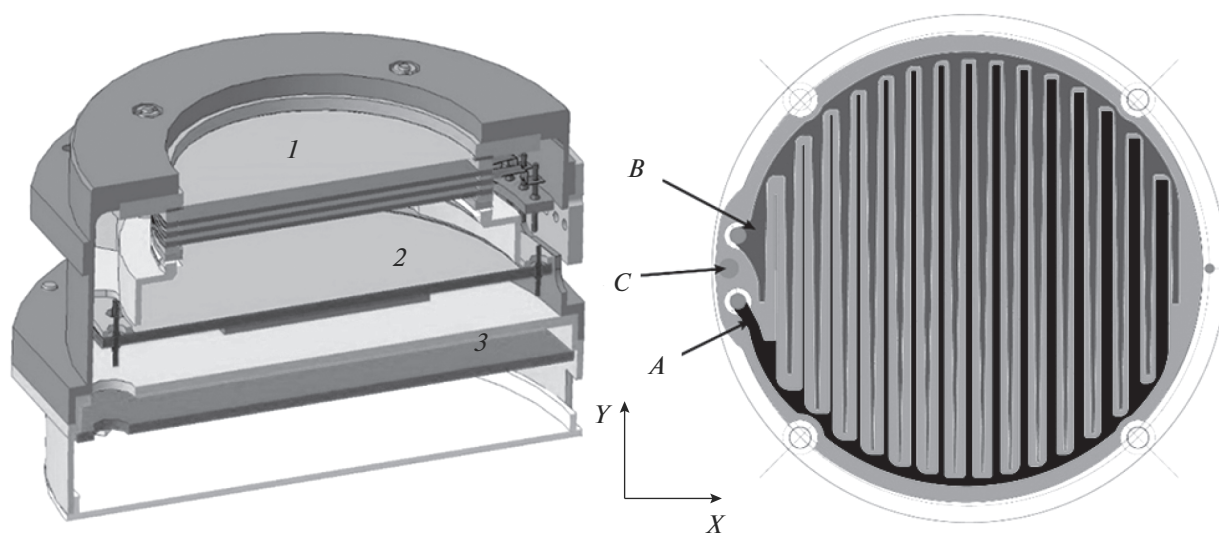


Рис. 2. Структура координатно-чувствительного детектора прибора АРИЕС-Л и анода, используемого в детекторе. 1 — шевронная сборка из трех микроканальных пластин; 2 — анод; 3 — электронные платы с зарядочувствительными элементами. А, В и С — сегменты анода (Моисеенко, 2019а).

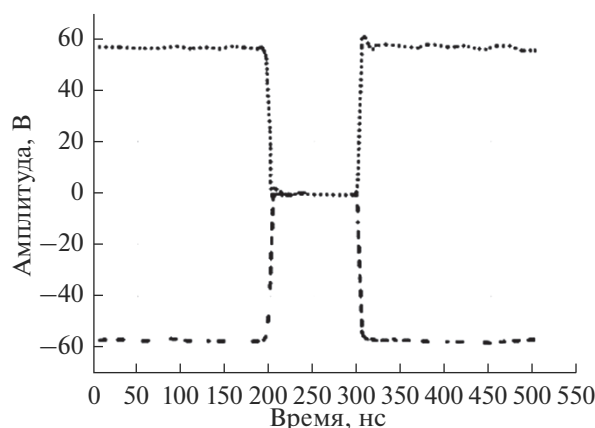


Рис. 3. Изменение потенциала на электродах затвора при работе прибора в режиме регистрации массового спектра. Ступенчатое изменение потенциала позволяет ионам пройти через затвор.

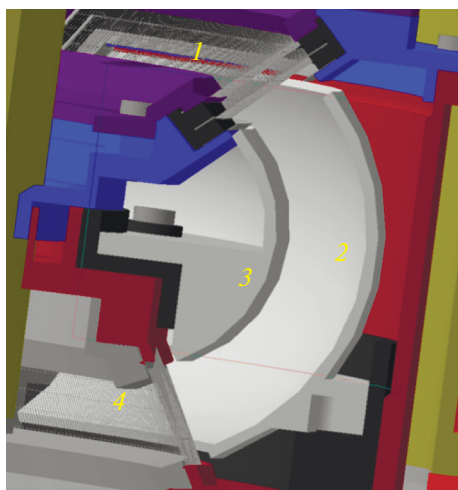


Рис. 4. Структура конвертера нейтральных частиц. 1 — входное окно с системой сеток, не пропускающих ионы; 2 — электрод-ионизатор; 3 — корректирующий электрод; 4 — выходное окно.

прибором. Для повышения эффективности ионизации нейтралов применено золотое покрытие электрода-анализатора (Wurz др., 2006).

ДОСТИГНУТЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для определения основных аналитических характеристик для образцов прибора АРИЕС-Л были проведены функциональные испытания (Моисеенко, 2019б), включавшие в себя:

- определение качества пропускания модуля электронной оптики прибора в зависимости от 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 — $\Delta E/E$;
- проверку массового разрешения $M/\Delta M$ для выбранных азимутальных и полярных углов;
- проверку работы конвертера нейтральных частиц.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРА ПРОПУСКАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ ПРИБОРА

Фактор пропускания электронной оптики — зависимость скорости счета детектора прибора от полярного и азимутального углов. Эта характеристика вместе данными об энергетическом разрешении позволяет сделать выводы о чувствительности прибора при регистрации частиц, попавших во входное окно с разных углов. Для штатного образца прибора проверка фактора пропускания проводилась для различных положений прибора с шагом 10° по азимутальному углу и 1° по полярному. В каждом положении прибора выполнялось накопление частиц в течение 5 с. Измерения проводились для стабилизировавшегося потока ионов с энергией 1 кэВ. Результаты проверки приведены на рис. 5. Из полученной зависимости видно, что прибор имеет наибольшую эффективность регистрации для полярных углов, близких к зениту.

Структура в виде колец, которую видно на рис. 5, вызвана затенением потока частиц кольцами электростатического затвора времяпролетной схемы прибора.

ПРОВЕРКА ПОЛЕЙ ЗРЕНИЯ ПРИБОРА

Для решения поставленных в рамках проекта Луна-25 научных задач модулю электронной оптики (МЭО) 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. 6. 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.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ПО ПОЛЯРНОМУ УГЛУ

Согласно техническим требованиям угловое разрешение прибора по полярному углу должно

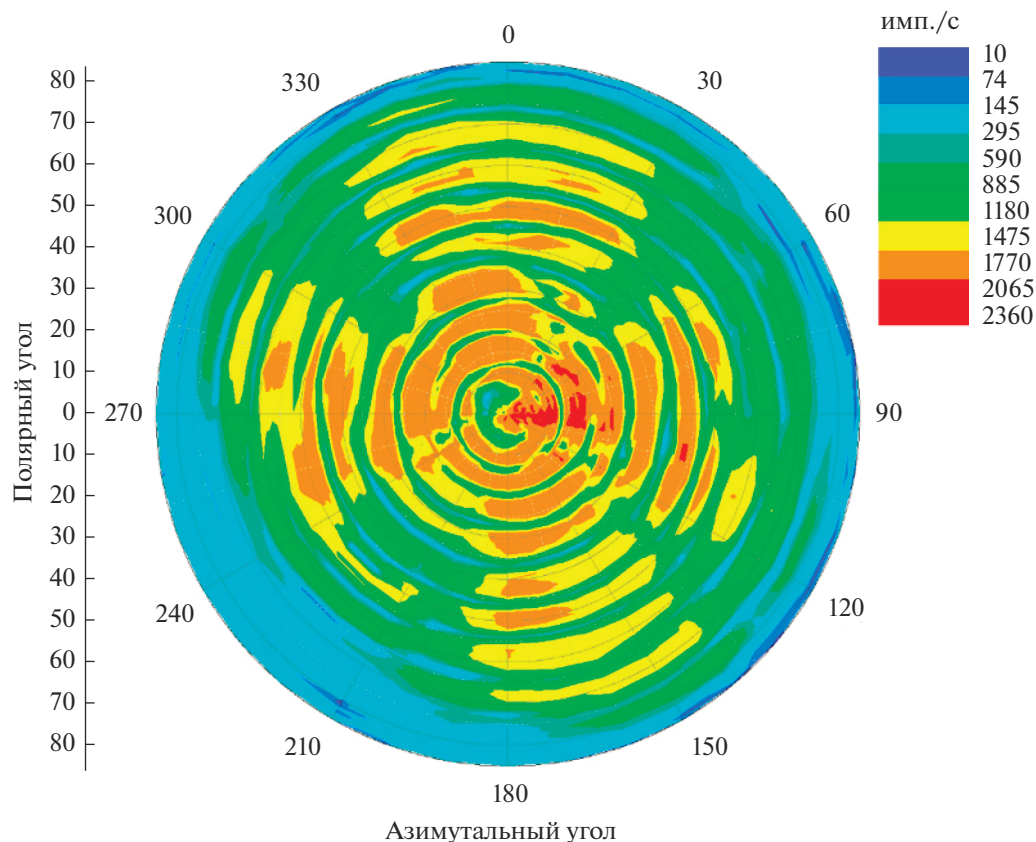


Рис. 5. Зависимость накопления частиц за время экспозиции 5 с от полярных координат прибора.

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 при-

бора на каждом полярном угле. Пример определения разрешения при сравнении изображений, полученных на полярных углах 10° и 40° , приведен на рис. 7. Наверху рисунка показаны изображения потоков ионов на детекторе прибора, сни-

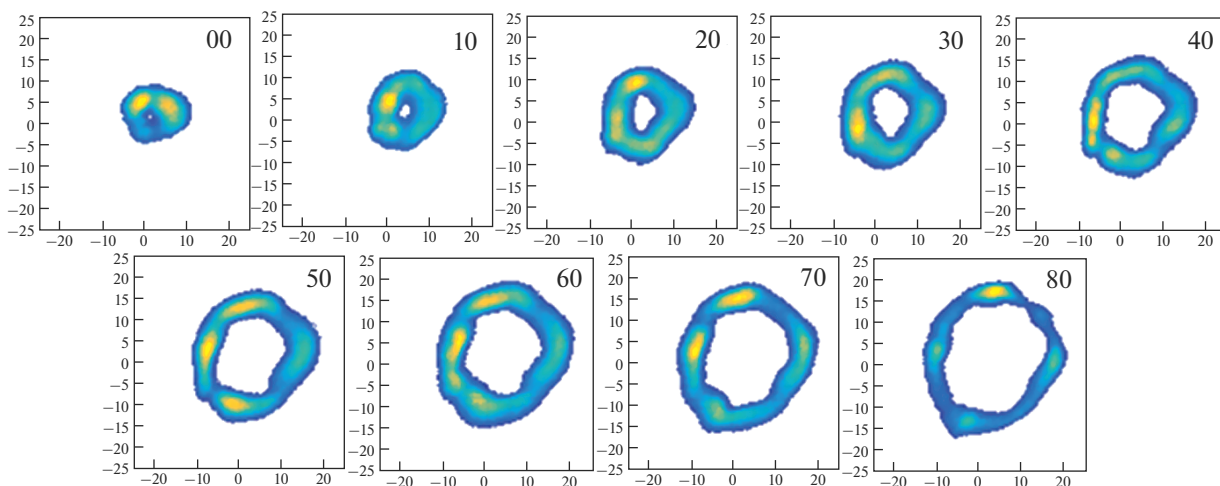


Рис. 6. Распределения потоков частиц на координатно-чувствительном детекторе ШО прибора АРИЕС-Л при выполнении проверки полей зрения прибора и соответствуют облучению прибора с фиксированного указанного полярного угла, и сумме 36 азимутальных углов с шагом 10° .

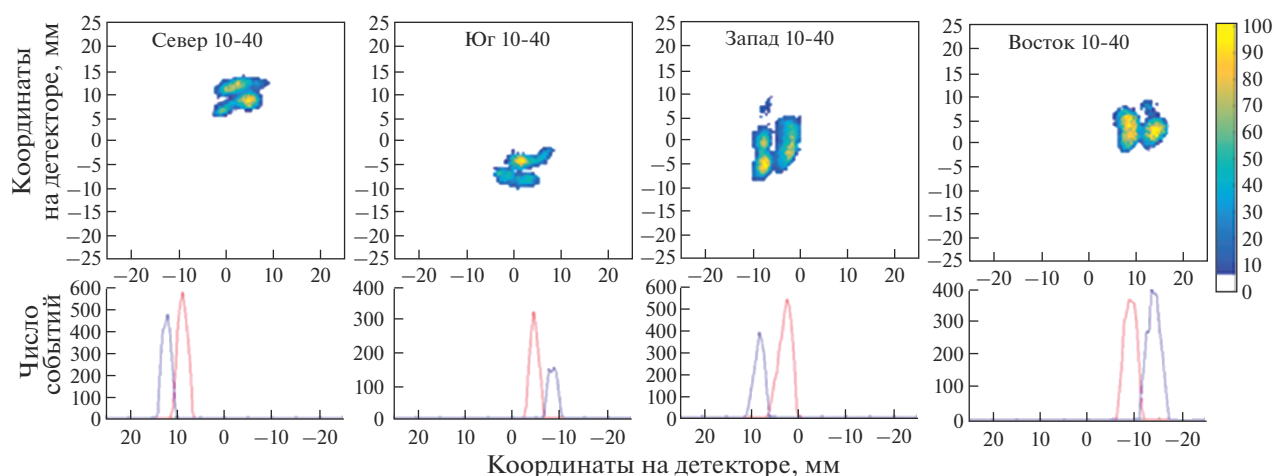


Рис. 7. Измерения, использованные для определения разрешения МЭО.

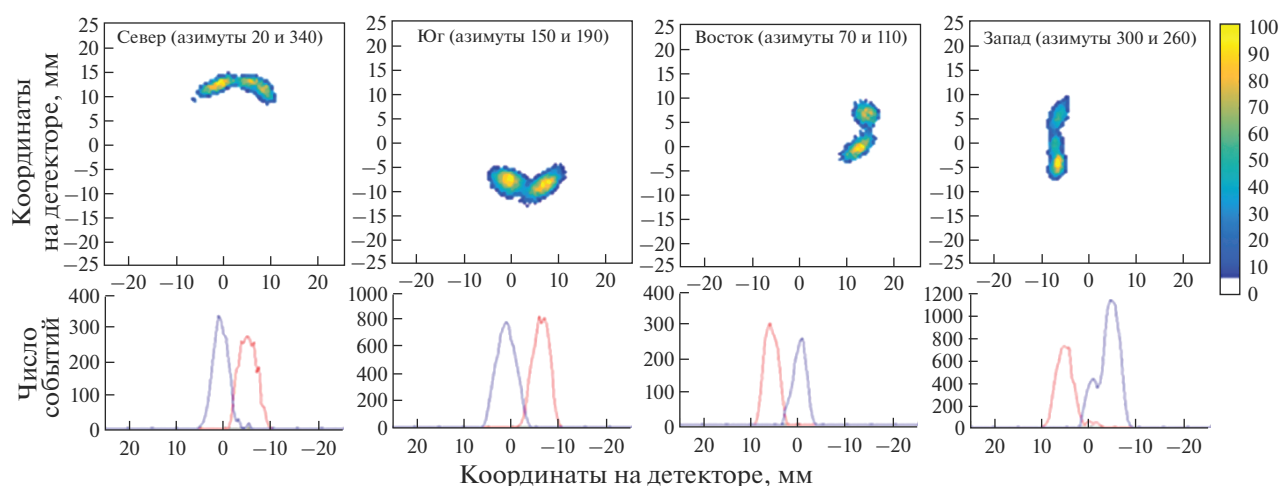


Рис. 8. Измерения, использованные для определения разрешения по азимутальному углу по изображениям на детекторе.

зу — профили этих изображений. Проведенные испытания показали, что разрешение штатного образца прибора по полярному углу для каждого азимута не хуже 30° , что соответствует предъявляемым требованиям.

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 рис. 8. Наверху рисунка показаны изображения потоков ионов на детекторе прибора, снизу — профили этих изображений. Анализ простран-

ственных распределений частиц на детекторе прибора показал, что разрешение по азимутальному углу для испытываемого образца МЭО не хуже 40° , что удовлетворяет предъявляемым требованиям.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ПО ЭНЕРГИИ $\Delta E/E$

Для штатного образца прибора определение энергетического разрешения $\Delta E/E$ проводилось для набора полярных и азимутальных углов с шагом 10° для азимутального угла и 2° для полярного. Проверка проводилась при фиксированном потенциале на оптике 1 кэВ. При этом для каждого положения прибора регистрировалась скорость счета детектора прибора в зависимости от энергий ионов, испускаемых ионным источником. Энергия ионов изменялась в диапазоне 1000 ± 100 эВ.

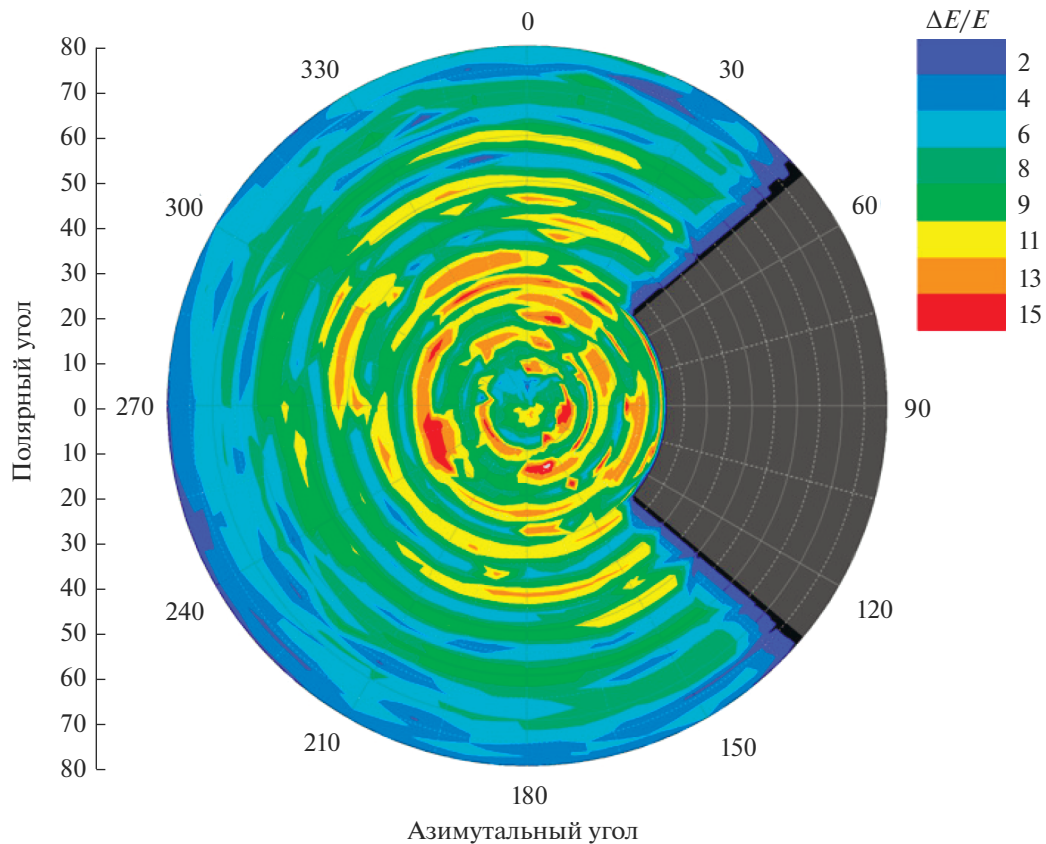


Рис. 9. Зависимость энергетического разрешения $\Delta E/E$ от полярного и азимутального углов. Сектор в правой части изображения соответствует области на детекторе, затеняемой конвертером нейтральных частиц и предназначенной для регистрации сигнала с конвертера нейтральных частиц.

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 рис. 9.

Полученные зависимости фактора пропускания оптики и $\Delta E/E$ будут использованы для расчета геометрического фактора прибора (Collinson и др., 2012) и восстановления функции распределения частиц, регистрируемых прибором в ходе космического эксперимента.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА ПРИБОРА

Геометрический фактор — величина, определяющая зависимость между количеством частиц, зарегистрированных прибором, и плотностью частиц в пространстве скоростей в элементе фазового пространства, заметаемом прибором. Единицы измерения геометрического фактора — эВ/(эВ ср см² с). В общем виде геометрический фактор как математический объект является тензором, индексы которого пробегают измеряемые прибором углы и энергии. Так как геометриче-

ские свойства оптики прибора АРИЕС-Л с достаточной точностью не зависят от энергии, на которую настроен прибор, то его геометрический фактор может быть представлен в виде двухмерной

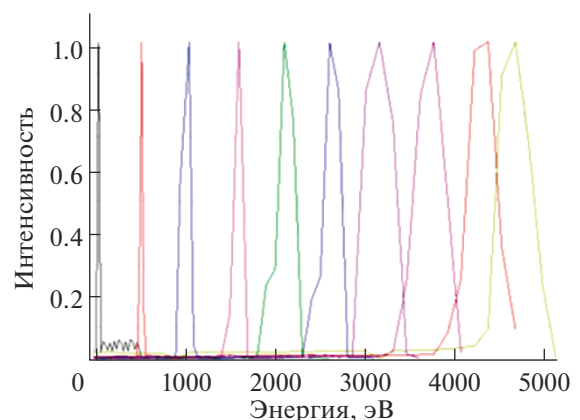


Рис. 10. Энергетические распределения потоков заряженных частиц, полученные при работе прибора в режиме регистрации энергетического спектра.

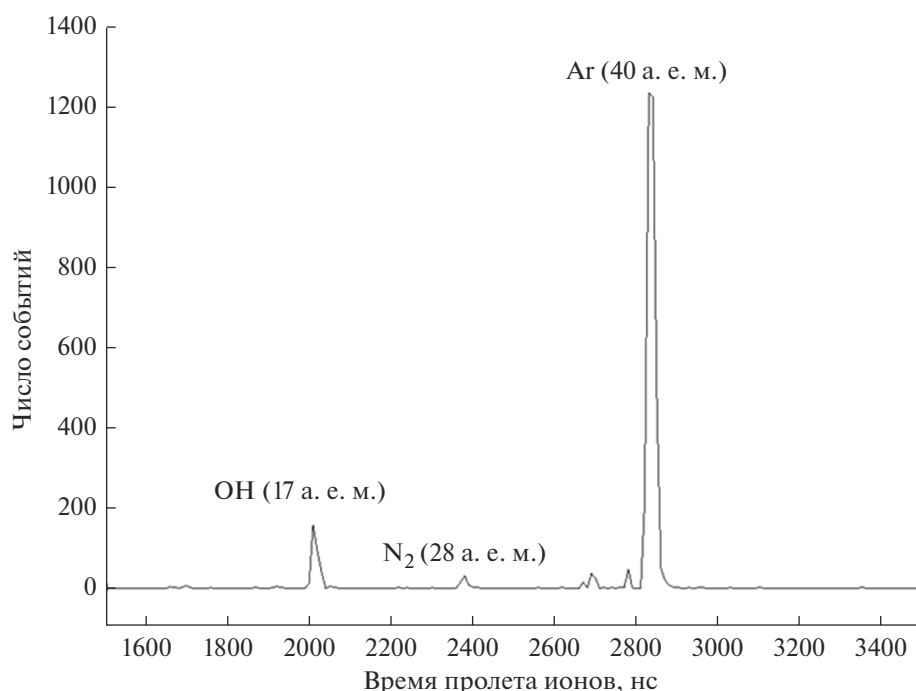


Рис. 11. Пример времяпролетного спектра для частиц с энергией 1 кэВ, северный азимут.

матрицы, одно из измерений которой соответствует полярным углам, а другое — азимутальным.

Для расчета геометрического фактора была применена формула из статьи (Collinson и др., 2012), адаптированная для прибора АРИЕС-Л:

$$GF_{ij} = \frac{\Delta\phi}{E_0^2} \sum_m \sum_n \frac{C_{mnj}}{\Phi} E_m \cos \theta_n \Delta E_m \Delta \theta_n,$$

где i — пробегает индексы полярных углов на сетке вычисления геометрического фактора (каждые 10°); j — пробегает индексы азимутальных углов на сетке вычисления геометрического фактора (каждые 10°); n — пробегает индексы полярных углов, на которых измерялась чувствительность прибора (каждые 2°); m — пробегает индексы энергий ионного источника, которые заматают энергетическое окно прибора; θ_n — экваториальный угол при n -ом измерении; $\Delta\phi$ — ширина пикселя азимутального угла прибора (10°); $\Delta\theta_n$ — ширина экваториального угла, заматаемого при n -ом измерении (2°); E_m — энергия ионов из источника; ΔE_m — энергетическая ширина ионов из источника ($3\% \times E_m$); C_{mnj} — скорость счета частиц при азимутальном угле j на полярном угле n на энергии источника m ; Φ — поток частиц из источника ($(1/q) \times 1.25 \times 10^{-10} \text{ А/см}^2 \approx 7.8 \times 10^8 \text{ частиц/см}^2 \text{ с}$); E_0 — максимум пропускания прибора (при фиксированном значении потенциалов на оптике) — 1000 эВ.

Экспериментальные и расчетные данные показали, что геометрический фактор прибора зависит

от азимутального и полярного углов и изменяется в диапазоне от $1.07\text{E}-06$ до $5.82\text{E}-10 \text{ эВ/}(\text{эВ ср см}^2 \text{ с})$.

ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРИБОРА В ЗАДАННОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ

Выполненные испытания прибора показали возможность регистрации ионов в диапазоне энергий от 10 до 5000 эВ. Выполненные лабораторные проверки показали нормальное функционирование прибора в заданном энергетическом диапазоне. Для проведения данной проверки сначала устанавливалось требуемое значение энергии ионов, затем осуществлялось сканирование этого потока испытываемым прибором. Примеры полученных энергетических распределений зарегистрированных ионов приведены на рис. 10.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Проверка массового разрешения проводилась для набора полярных углов от 10° до 80° с шагом 10° и азимутальных углов от 0° до 350° также с шагом 10° . 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 $M/\Delta M$ рассчитывалось для массового пика аргона (40 а. е. м.) по полной ши-

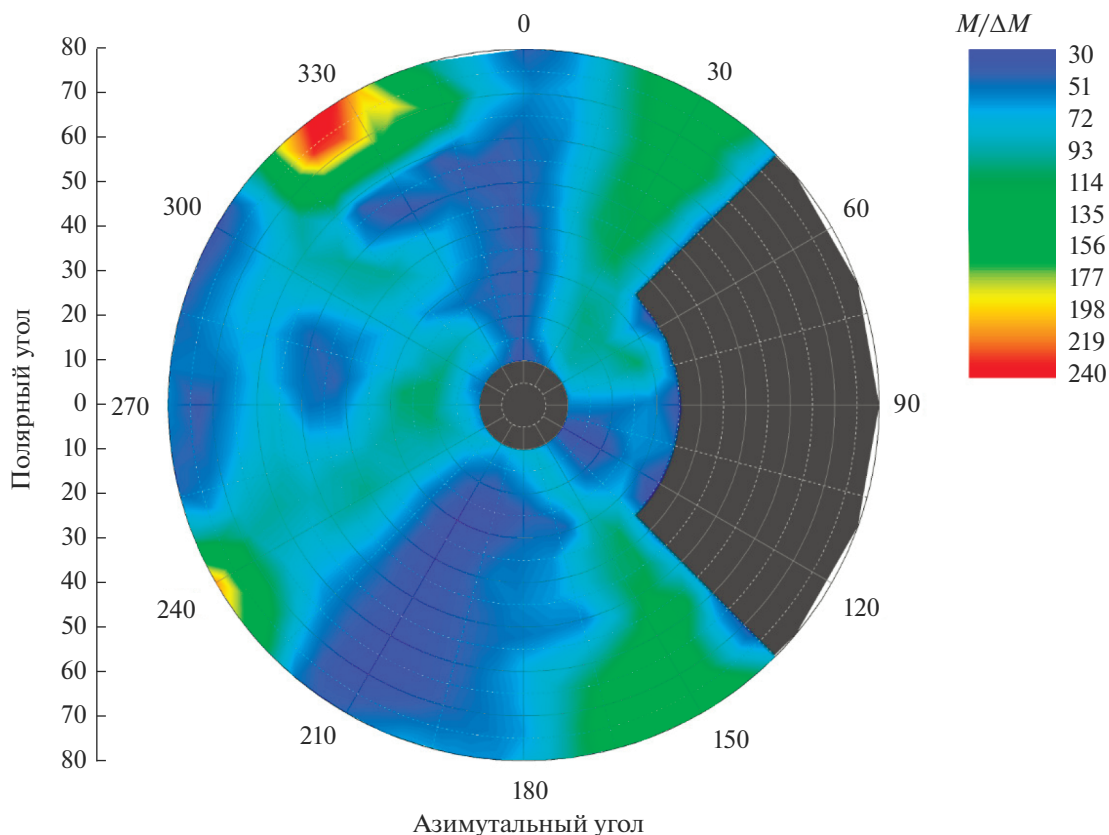


Рис. 12. Зависимость $M/\Delta M$ от угла прихода частиц.

рине на полувысоте. Пример времяпролетного спектра для энергии 1 кэВ при напуске азота приведен на рис. 11.

На основании полученных данных была построена зависимость массового разрешения прибора, приведенная на рис. 12.

Проведенные исследования показали неравномерность массового разрешения в зависимости от азимутального и полярного углов. Данная особенность вызвана геометрией электронно-оптической схемы, в частности — конструкцией электростатического затвора, а также — неравномерностями энергетического разрешения $\Delta E/E$.

Поскольку в приборе применяется времяпролетная система определения массового состава ионов с запирающим 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, Во-

сток, Запад) была проверена зависимость массового разрешения от энергии частиц. Результат проверки приведен на рис. 13. Приведенная зависимость получена для времени открытия затвора 15 нс.

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 рис. 14.

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 $\sim 3 \times 10^{-7}$, для ШО $\sim 2 \times 10^{-6}$. Примеры распределений потока ионов

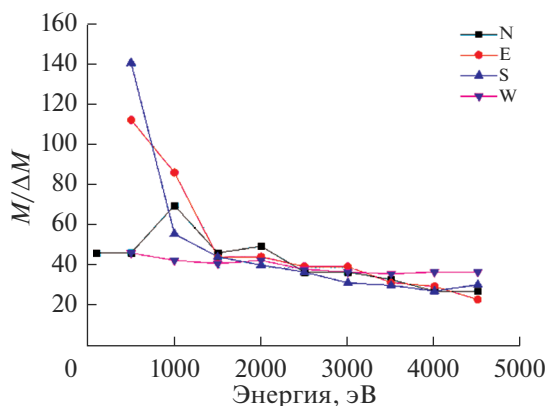


Рис. 13. Зависимость массового разрешения прибора от энергии частиц при времени открытия электростатического затвора 15 нс для четырех азимутальных углов. Ошибка в определении значения $M/\Delta M$ не превышает 4% и обусловлена разрешением электростатического анализатора прибора $\Delta E/E$, которое для штатного образца прибора находится в пределах от 3 до 13%.

из конвертера нейтральных частиц, зарегистрированных прибором, приведены на рис. 15.

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, конечный номер ступеньки, время нахождения на каждой ступеньке, число проходов выбранной таблицы. Время нахождения прибора на каждой ступеньке задается внешней командой и может варьироваться от 0.05 до 1000 с.

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 32-разрядных таблиц исследуемый энергетический диапазон делится на 32 ступени, при этом значение напряжения растет до

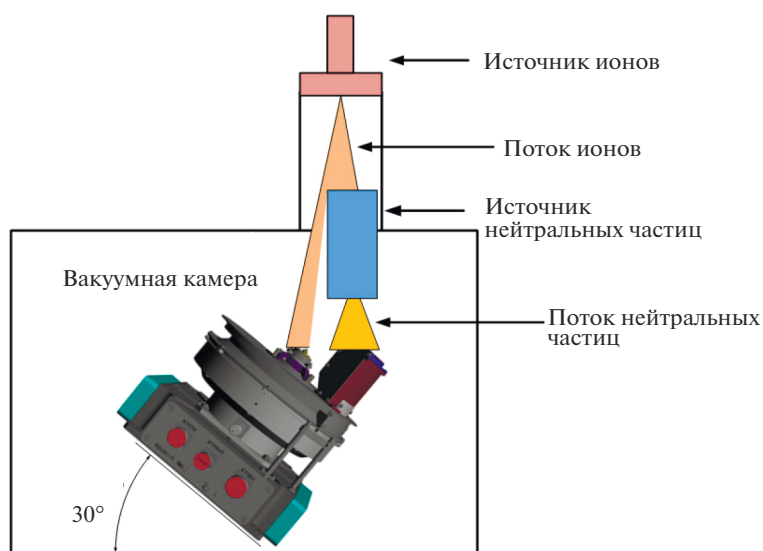


Рис. 14. Размещение прибора в АРИЕС-Л РМ для проверки функционирования конвертера нейтральных частиц.

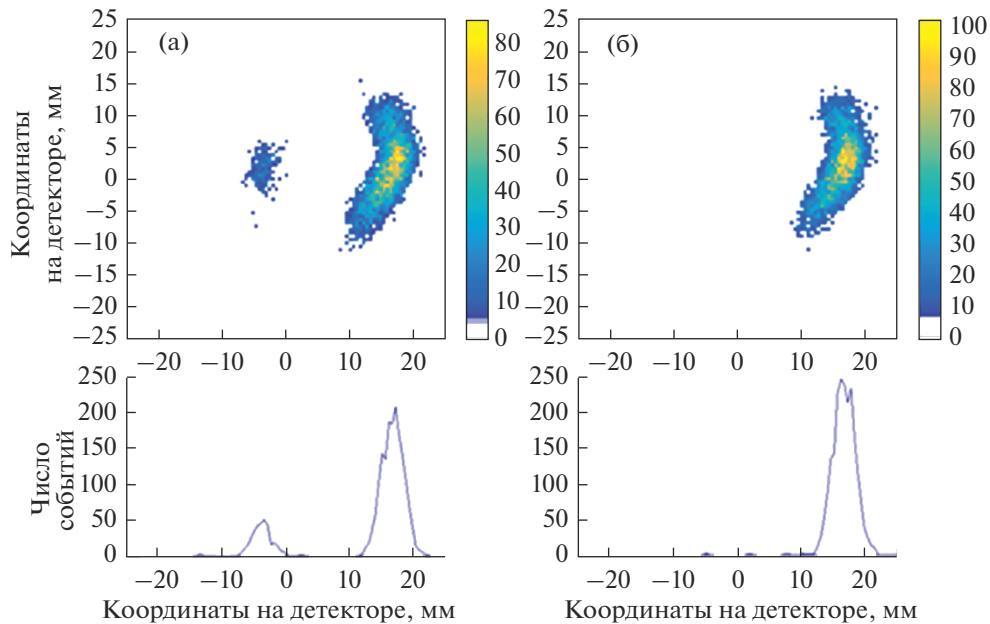


Рис. 15. Распределения потоков частиц на детекторе, полученные при работе с конвертером нейтральных частиц: (а) — одновременная регистрация первичных частиц из источника ионов и нейтралов из конвертера нейтральных частиц, (б) — регистрация потока нейтральных атомов без мониторинга первичного ионного потока.

середины таблицы, затем убывает, возрастание и спад напряжения симметричны. Работа по 32-разрядным таблицам обеспечивает двойной проход одного и того же диапазона энергий.

В случае 64-х разрядных таблиц энергетический диапазон прибора делится на 64 ступеньки и полученные значения потенциалов записываются таким образом, что до 32 ступеньки напряжение растет, а с 33 по 64 — убывает. Использование 64-разрядных таблиц позволяет осуществлять подробное сканирование потока частиц по энергиям.

На рис. 16 приводится покрытие энергетического диапазона прибора 32-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 Н 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 Н позволяют осуществлять одновременную регистрацию как потока нейтральных атомов, так и энергетического спектра заряженных частиц в диапазоне энергий до 1500 эВ.

Приведенные на рис. 17 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 $\Delta M/M \geq 20$. Вторая группа таблиц имеет фиксированное значение времени открытия затвора 15 нс и обеспечивает максимальное разрешение прибора в режиме регистрации массового

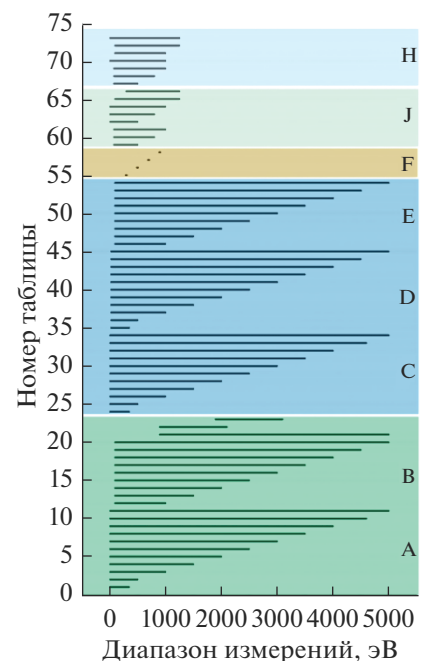


Рис. 16. Покрытие энергетического диапазона 32-разрядными таблицами.

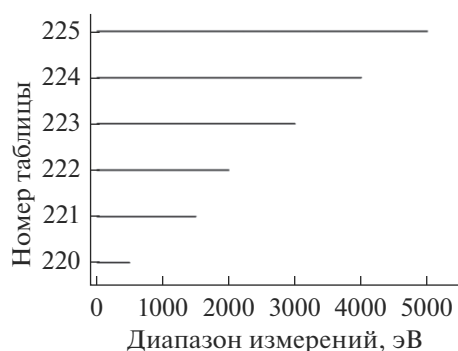


Рис. 17. Покрытие энергетического диапазона 64-разрядными таблицами. Энергетический диапазон одинаков как для линейных, так и логарифмических 64-разрядных таблиц.

спектра $\Delta M/M \geq 30$. 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-разрядные таблицы, перекрывающие полный энергетический диапазон прибора. График покрытия энергетического диапазона для линейных и логарифмических 64-разрядных таблиц приведен на рис. 17.

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.

ПРОВЕРКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРИБОРА ПО ШТАТНЫМ ЦИКЛОГРАММАМ 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 ч 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, проверяется работа конвертера нейтральных атомов. Полученные в результате исполнения этих циклограмм данные позволяют получить информацию об условиях работы прибора и сформиро-

вать программу последующих измерений на поверхности Луны.

В условиях космического эксперимента прибор планируется включать на 1.5 ч в режиме измерений, после чего снимать с него питание на 2 ч. 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 МКП-детекторе. Это сделано для того, чтобы восстановить работу прибора в случае его отключения при превышении максимально допустимой температуры узлов прибора. Вывод детектора на рабочий режим представляет собой плавное увеличение потенциала на детекторе с шагом 50 В за 2 с. Для ШО АРИЕС-Л рабочий потенциал детектора на момент проведения настроек и калибровок составляет 2500 В.

Циклограммы работ прибора на первые 24 ч измерений составлена таким образом, чтобы с каждым включением прибора осуществлять регистрацию частиц в более широком диапазоне энергий. После посадки вокруг космического аппарата могут содержаться большое количество пылевых частиц, поднятых с поверхности в результате работы двигателей, а также продукты дегазации самого космического аппарата. 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. При проверке работы по циклограммам также фиксировалось среднее потребление прибора. Эта информация будет использована при формировании плана работ прибора в составе КА (Моисеенко, 2019а).

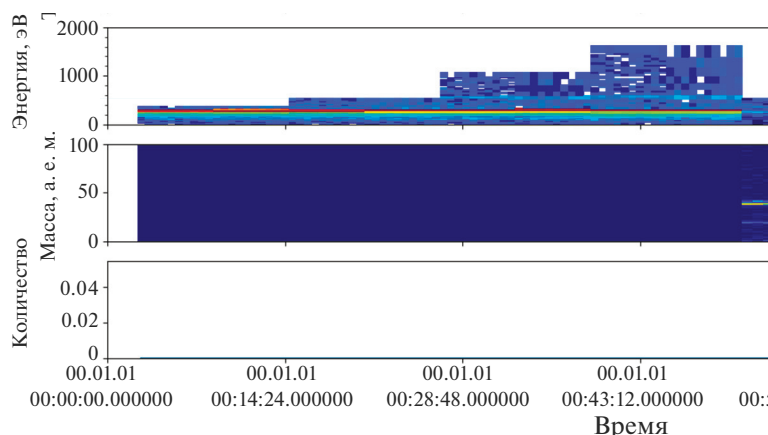


Рис. 18. Работа прибора по циклограмме первого включения после посадки КА. Циклограмма включает в себя проверку работы прибора по регистрации энергетического спектра в диапазоне 10–1500 эВ и регистрацию энерго-масс-спектра в диапазоне 10–500 эВ.

ЦИКЛОГРАММА ПЕРВОГО ВКЛЮЧЕНИЯ 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 с. На рис. 37 показан результат проверки работы прибора по циклограмме первого включения в лабораторных условиях.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПРИБОРА

Для обеспечения получения достоверной информации об энергетическом составе регистрируемых частиц, прибор не регистрирует частицы, пришедшие на детектор во время переключения потенциала между соседними ступеньками таб-

лицы. Время переключения задано программно и составляет 0.25 с. Экспериментально было установлено, что за этот промежуток времени переходные процессы заканчиваются. Также прибор имеет задержку между проходами по таблицам, равную 1 с. Лабораторные испытания показали возможность получения достоверной информации об энергетическом составе регистрируемых ионов при длительности ступеньки 0.125 с.

Проведенная проверка быстродействия прибора показала, что время регистрации полного энергетического спектра составляет 12.5 с. Данный показатель будет улучшен в следующих исполнениях приборов для новых космических миссий за счет уменьшения длительности ожидания между измерениями на энергетических ступеньках и исключения задержки между измерениями между рабочими таблицами. Кроме того, алгоритм управления прибором позволяет проводить измерения в настраиваемом диапазоне энер-

Аналитические и технические характеристики образцов прибора АРИЕС-Л

Аналитические характеристики			
Проверяемый параметр	Требуемое значение	КДО	ШО
Поле зрения по полярному углу, град	0–60	0–88	0–80
Разрешение по полярному углу, град	Не хуже 30	30	30
Разрешение по азимутальному углу, град	Не хуже 60	40	40
Энергетическое разрешение, $\Delta E/E$	Не хуже 15%	От 2 до 14%	От 3 до 13%
Разрешение по массе, $M/\Delta M$	Не менее 15 для 40 а. е. м. (на энергии 1 кэВ)	>30	>30
Энергетический диапазон	150–4500 эВ	30–5000 эВ	10–5000 эВ
Регистрация нейтральных частиц	Да	Да, эффективность $\sim 3 \times 10^{-7}$	Да, эффективность $\sim 2 \times 10^{-6}$
Технические характеристики			
Габариты, мм	190 × 186 × 165		
Масса, кг	2.5		
Потребление, Вт	2.5–7 Вт, в зависимости от режима работы		

гий, выполняя сканирование не по полной таблице, а только по ее заданному диапазону, что также позволяет увеличить частоту получения спектра в выбранном диапазоне энергий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Сочетая комбинацию электростатического и времяпролетного элементов электронной оптики, прибор позволяет проводить анализ заряженных частиц по соотношению энергии к заряду E/Q и выполнять массовый анализ потока частиц в диапазоне энергий от 10 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.

КДО и ШО прибора АРИЕС-Л прошли полный объем проверок, настроек и калибровок, необходимых для определения аналитических характеристик прибора и обеспечения наиболее достоверной интерпретации получаемой научной информации. Сравнение фактических значений проверяемых параметров с требованиями, предъявляемыми к прибору, а также его технические характеристики приведены в таблице.

Выполненные работы позволили достичь требуемых от прибора аналитических характеристик: обеспечить необходимые поля зрения, угловое, энергетическое и массовое разрешение. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Казмерчук П.В., Мартынов М.Б., Москатиных И.В., Сысоев В.К., Юдин А.Д. Космический аппарат “Луна-25” — основа новых исследований Луны // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4(34). С. 9—19.

Моисеенко Д.А. “Энерго-масс анализаторы для исследования солнечной плазмы и межпланетной пыли. Моделирование. Принципы создания.” Дис. канд.-физ. мат. наук, М.: 2019. С. 31—65.

Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Шестаков А.Ю., Журавлев Р.Н., Митюрин М.В., Моисеев П.П., Нечушкин И.И., Родькин Е.И., Васильев А.Д., Летуновский В.В. Аппаратно-программный комплекс для настроек и калибровок ионных масс-спектрометров для космических миссий // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 3. С. 52—62.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219020265>

Colaprete A., Sarantos M., Wooden D.H., Stubbs T.J., Cook A.M., Shirley M. How surface composition and meteoroid impacts mediate sodium and potassium in the lunar exosphere // Science. 2015. V. 351(6270). P. 249—252.
<https://doi.org/10.1126/science.aad2380>

Collinson G.A., Dorelli J.C., Avakov L.A., Lewis G.R., Moore T.E., Pollock C., Adrian M.L. The geometric factor of electrostatic plasma analyzers: A case study from the Fast Plasma Investigation for the Magnetospheric Multi-scale mission // Rev. Sci. Instruments. 2012. V. 83(3). P. 033303.
<https://doi.org/10.1063/1.3687021>

Dukes C.A., Johnson R.E. Contribution of surface processes to the lunar exosphere // Encyclopedia of Lunar Science. 2017. P. 1—7.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-05546-6_96-1

Futaana Y., Barabash S., Holmström M., Bhardwaj A. Low energy neutral atoms imaging of the Moon // Planet. and Space Sci. 2006. V. 54(2). P. 132—143.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.10.010>

Johnson R.E., Baragiola R. Lunar surface: Sputtering and secondary ion mass spectrometry // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18(11). P. 2169—2172.
<https://doi.org/10.1029/91gl02095>

Los J., Geerlings J.J. Charge exchange in atom-surface collisions // Phys. Repts. 1990. V. 190(3). P. 133—190.
[https://doi.org/10.1016/0370-1573\(90\)90104-a](https://doi.org/10.1016/0370-1573(90)90104-a)

Lue C., Halekas J.S., Poppe A.R., McFadden J.P. ARTEMIS observations of solar wind proton scattering off the lunar surface // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2018. V. 123. P. 5289—5299.
<https://doi.org/10.1029/2018JA025486>

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 // Rev. Sci. Instruments. 1981. V. 52(7). P. 1067—1074.
<https://doi.org/10.1063/1.1136710>

Sigmund P. Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets // Phys. Rev. 1969. V. 184. P. 383.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.187.768>

Vaisberg O., Berthellier J.-J., Moore T., Avakov L., Leblanc F., Leblanc F., Moiseev P., Moiseenko D., Becker J., Collier M., Laky G., Keller J., Koynash G., Lichtenegger H., Leibov A. et al. The 2π charged particles analyzer: All-sky camera concept and development for space missions // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. P. 11750—11765.
<https://doi.org/10.1002/2016JA022568>

Wurz P., Scheer J., Wieser M. Particle scattering off surfaces: Application in space science // e-J. Surface Sci. and Nanotechnology. 2006. V. 4. P. 394—400.
<https://doi.org/10.1380/ejssnt.2006.394>

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.
<https://doi.org/10.1038/23204>