

УДК 520.646

СПЕКТРОМЕТР ЭЛЕКТРОНОВ «ТОТЭМ-Э» ДЛЯ ПРОЕКТА «СТРАННИК»

© 2024 г. Д.А. Моисеенко^{1,*}, А.Ю. Шестаков¹, О.Л. Вайсберг¹, Р.Н. Журавлев¹,
М.В. Митюрин², П.П. Моисеев²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²ООО «НПП «Астрон-электроника»», Орел, Россия

* modaldi@cosmos.ru

Поступила в редакцию 28.04.2023 г.

После доработки 12.05.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Описывается принцип функционирования спектрометра электронов «ТОТЭМ-Э», разрабатываемого для комплекса научной аппаратуры «Странник» (КНА-С) проекта «Резонанс-МКА», приводятся аналитические характеристики конструкторско-доводочного образца прибора, полностью соответствующего штатному образцу в части применяемых электронных компонентов и электронно-оптической схемы, описывается процедура функциональных испытаний прибора, приводится описание структуры и принципов функционирования аппаратно-программного комплекса, созданного для испытаний приборов подобного типа. Конструкция прибора «ТОТЭМ-Э» предлагает новый подход к измерениям потока частиц, позволяющий увеличить достоверность и скорость измерений. Особенностью предложенной схемы представляется возможность одномоментного измерения потоков электронов в плоском сечении в пространстве скоростей в диапазоне энергий от E_0 до $6.5E_0$, где E_0 — минимальная регистрируемая прибором энергия частиц. Это достигается использованием двух конических электростатических зеркал, которые отбирают электроны из плоского 360-градусного сечения потока для последующего анализа по энергии и применением координатно-чувствительного детектора для одномоментной регистрации частиц.

DOI: 10.31857/S0023420624010037

ВВЕДЕНИЕ

В рамках космической миссии «Резонанс-МКА» (КНА-С) планируется создание малого космического аппарата, способного проводить комплекс измерений в магнитосфере Земли (<https://www.lasp.space.ru/projects/information-systems/resonance/>). Космический аппарат оснащается научной аппаратурой, позволяющей решать следующие научные задачи:

- изучение взаимодействия волн и частиц во внутренней магнитосфере Земли;
- определение динамических характеристик магнитосферного циклотронного мазера;
- изучение динамики кольцевого тока: его формирования и распада, а также восстановления плазмосферы после геомагнитных возмущений;
- определение роли мелкомасштабных электродинамических структур в глобальной динамике магнитосферной плазмы;

- изучение процессов ускорения частиц в авроральной области магнитосферы;
- исследование свойств источников аврорального километрового радиоизлучения;
- определение физических процессов, определяющих структуру области ускорения в авроральной магнитосфере Земли.

Предполагаемая орбита космического аппарата рассчитывается в том числе с целью изучения мелкомасштабной структуры критических областей магнитосферы, где происходят процессы трансформации энергии. Исследование мелкомасштабных процессов включает несколько характерных задач: определение структуры тонких границ плазменных образований, длин волн и дисперсионных характеристик плазменных волн, тонкой структуры ускорительных процессов в плазме, характеристик многомасштабной турбулентности. Все эти проблемы могут быть сведены к задаче измерений с максимально высоким временным разрешением и/или к задаче определения пространственных

размеров упомянутых объектов, необходимых для определения физических параметров (длина волны, толщина структуры), известных по теоретическим моделям. Такого рода исследование требует многомасштабных/многоточечных измерений параметров плазмы и электромагнитных полей.

Космический аппарат (КА) «Резонанс-МКА» оснащен комплексом научных приборов, позволяющих производить измерения параметров плазмы (это датчики солнечного ветра, ионные энерго-масс-спектрометры, магнитометр и спектрометр электронов), что позволит исследовать процессы, происходящие во внутренней магнитосфере Земли и ее авроральной области, изучать взаимодействия между волнами и частицами на малых масштабах и осуществлять мониторинг крупномасштабных явлений, связанных с геомагнитной активностью.

В настоящей статье приводится описание параметров и принципов функционирования прибора, предназначенного для измерения электронной компоненты надтепловой плазмы — спектрометра электронов «ТОТЭМ-Э».

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИБОРА

Планируется, что КА «Резонанс-МКА» будет запущен на околоземную орбиту с высотой апогея 27 500 км, высотой перигея 1000 км и наклоном 63.4°. Такие параметры орбиты позволят проводить измерения электронной компоненты магнитосферной плазмы вдоль магнитных силовых линий, находясь внутри магнитосферных трубок достаточно долгое время. Быстрое измерение функции распределения электронов позволит исследовать процессы наполнения магнитосферных трубок плазмой в ходе естественных и активных процессов в магнитосфере. При этом существующая гиротропия значительно упрощает наблюдения плазмы в замкнутых силовых трубках, позволяя измерять распределение заряженных частиц только в полуплоскости, т.е. по питч-углам, что также способствует увеличению скорости измерения.

Учитывая параметры орбиты КА, наибольший интерес могут представлять измерения частиц в авроральных зонах. Исследования авроральной области магнитосферы на высотах одного-двух земных радиусов и выше ранее проводились различными спутниками, в том числе *S3-3*, *DE-1*, *Viking*, *FAST* и «*Интербол-2*». Одним из наиболее интересных результатов этих исследований было определение местоположения области ускорения. На основе полученных данных были сделаны выводы, что область ускорения находится на высотах одного — трех

земных радиусов. Анализ функции распределения электронов и ионов показывает, что на этих высотах направленное вверх электрическое поле ускоряет нисходящие электроны и восходящие ионы [1]. В работе [2] сообщается об измерении значительного по амплитуде квазистатического продольного электрического поля, существование которого интерпретируется в терминах крупномасштабных ускоряющих структур, а мелкомасштабные электростатические структуры, солитоны и двойные слои обсуждаются в работах [3, 4]. Большинство измерений волн и мелкомасштабных структур интерпретировались как электростатические, но в ряде случаев делаются выводы о существовании в авроральной области электромагнитных волн, которые могут возникнуть в результате взаимодействия волн и частиц [5, 6]. Исследования на спутниках *S3-3* и *Viking* в области низких частот носили ограниченный характер из-за отсутствия измерений или ограничений по чувствительности магнитных датчиков в диапазоне частот 0.1–10 Гц. Например, на спутнике *Viking* использовалась индукционная антенна, предназначенная в первую очередь для измерений на десятках килогерц.

Из теоретических работ [7, 8] известно, что электромагнитные волны с ограниченным продольным электрическим полем, так называемые кинетические альвеновские волны, могут генерироваться в авроральной области [9] и вносить вклад как в продольное, так и поперечное ускорение заряженных частиц. Подтверждение теоретических моделей связано с экспериментальными трудностями, поскольку необходимы долговременные однородные измерения в точках, разнесенных вдоль силовой линии магнитного поля. Частично такая возможность будет реализована в рамках проекта «Резонанс-МКА» в ходе выполнения серии быстрых измерений функций распределения частиц в различных областях силовых трубок.

Существенным элементом динамики плазмы выступают электроны и ионы, энергия которых в несколько раз выше температуры плазмы. Такие частицы появляются в результате ускорения в динамичных электромагнитных полях. Из-за высокой энергии эти частицы могут уходить на большие расстояния от места ускорения и становятся очень удобным «инструментом» и индикатором для изучения процессов конверсии энергии. В астрофизике проблема ускорения частиц космических лучей представляется одной из центральных. В этом смысле околоземное пространство — уникальный объект, в котором могут быть исследованы непосредственно, «изнутри» многие физические процессы ускорения частиц, взаимодействие волн

и частиц, определяющее динамику и излучение в удаленной плазме астрофизических объектов.

Как правило, предполагаются стохастические механизмы ускорения, в которых наблюдаемая энергия набирается в ходе случайных многократных единичных актов взаимодействия, в каждом из которых частице передается небольшая энергия. При этом формируются так называемые степенные спектры частиц по энергии, в которых интенсивность потоков частиц снижается по степенному закону при повышении энергии без каких-либо локальных особенностей спектра, за исключением, возможно, степени наклона. К числу таких механизмов относится, например, ускорение при многократном отражении от ударных волн, ускорение при взаимодействии с турбулентностью и пр. Отдельно рассматриваются процессы вспышечного ускорения, характерные для эпизодов взрывного выделения энергии, однако их закономерности известны хуже.

Современные исследования энергичных частиц, в том числе предшественником предлагаемого эксперимента прибором ДОК-2 на спутнике «Интербол», позволили выявить новый распространенный класс космических ускорительных явлений, носящих импульсный (транзистентный) характер (длительностью до 1–2 мин) и образующих квазимоноэнергетические пучки ускоренных ионов. Такие явления происходят при деформации и перестройке структуры на околоземной ударной волне [10–12], а также при вспышечном пересоединении (кипении) в хвосте магнитосферы [13]. Эти процессы ускорения гораздо более эффективны, чем стохастические, и могут давать доминирующий вклад в общий нагрев и ускорение плазмы [14]. В ходе эксперимента «Интербол» были

установлены места таких явлений, причины их появления, определен общий энергетический состав. Однако не удалось полностью исследовать, например, структуру электромагнитных полей в зоне ускорения, что в первую очередь было связано с малым временным разрешением эксперимента ДОК-2 в разреженной плазме внешней магнитосферы. Поэтому проведение эксперимента по изучению ускорения частиц во внешней магнитосфере Земли с одновременным высоким разрешением по энергии и по времени и в комплексе с измерениями других параметров плазмы представляется по-прежнему актуальным.

СТРУКТУРА ПРИБОРА «ТОТЭМ-Э»

Прибор «ТОТЭМ-Э» представляет собой спектрометр электронов, позволяющий разделять отрицательно заряженные частицы по соотношению E/Q с использованием электростатического метода анализа. Внешний вид прибора и его сечение, демонстрирующее внутреннее строение, приведены на рис. 1.

Устройство представляет собой моноблок, который условно можно разделить на два модуля: модуль электронной оптики и модуль электроники. Основные элементы модуля электронной оптики – конические электростатические зеркала М1, М2, центральная диафрагма и корректирующий электрод. В состав модуля электроники прибора входят электронные платы интерфейса информационного обмена, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей (АЦП/ЦАП), высоковольтные источники питания и координатно-чувствительный детектор (КЧД) на основе микроканальных пластин (МКП).

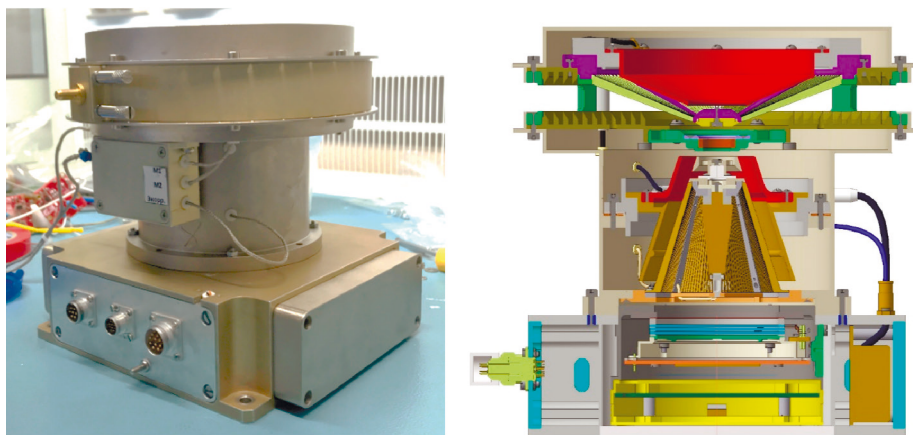


Рис. 1. Внешний вид прибора «ТОТЭМ-Э» и сечение, демонстрирующее его внутреннее строение.

МОДУЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ

Внутренняя структура модуля электронной оптики и траектории движения частиц различных энергий, полученные при моделировании параметров работы электронной оптики прибора в программе *SIMION*, приведены на рис. 2.

Принцип работы электронно-оптической схемы прибора следующий: поток частиц попадает во входное окно прибора и проходит через коллиматор (1), после чего отражается на зеркале M1 (2) и, пройдя через центральную диафрагму (3), попадает на зеркало M2 (4). На зеркале M2 (4) происходит повторное отражение частиц, после чего они попадают на координатно-чувствительный детектор (5) на основе микроканальных пластин, расположенный в модуле электроники прибора. При этом частицы с большими энергиями попадают на области детектора с большим удалением от центра, частицы с меньшими энергиями регистрируются ближе к центру детектора, а за определение направления прилета частицы в прибор отвечает сектор детектора, в котором была зарегистрирована частица. Корректирующий электрод (6) служит для корректировки траекторий частиц с малыми энергиями $E_0 \leq 500$ эВ.

Поле зрения прибора составляет $360 \times 5^\circ$, за исключением затенений опорами конструкции модуля электронной оптики. Разработанная электронно-оптическая схема позволяет проводить одномоментную регистрацию электронов в диапазоне энергий от E_0 до $5E_0$, где E_0 – минимальная энергия регистрируемых частиц, задаваемая потенциалом на зеркалах. Эта особенность прибора позволяет осуществлять быструю регистрацию энергетического спектра частиц в широком диапазоне энергий.

МОДУЛЬ ЭЛЕКТРОНИКИ

Модуль электроники прибора «ТОТЭМ-Э» включает в себя детектор на основе микроканальных пластин, электронные платы с модулями АЦП/ЦАП, высоковольтные источники питания, необходимые для подачи потенциалов на элементы электронной оптики и детектор, плату управления и плату интерфейсов. Структурная схема модуля электроники приведена на рис. 3.

КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР

Для регистрации частиц, прошедших через электронно-оптическую схему прибора, используется координатно-чувствительный детектор на

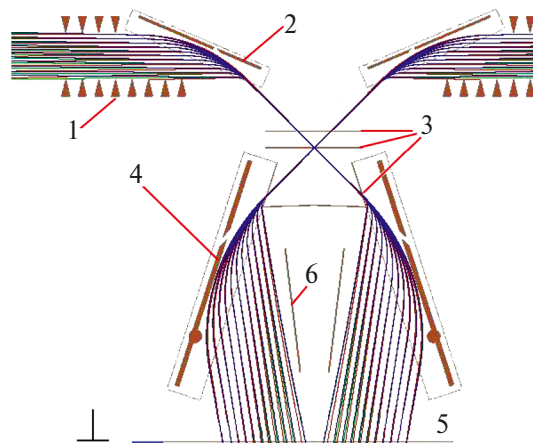


Рис. 2. Моделирование прохождения частиц через электронно-оптическую схему прибора «ТОТЭМ-Э» в программе *SIMION*: 1 – коллиматор; 2 – электростатическое зеркало M1; 3 – центральная диафрагма; 4 – электростатическое зеркало M2; 5 – плоскость детектора; 6 – корректирующий электрод.

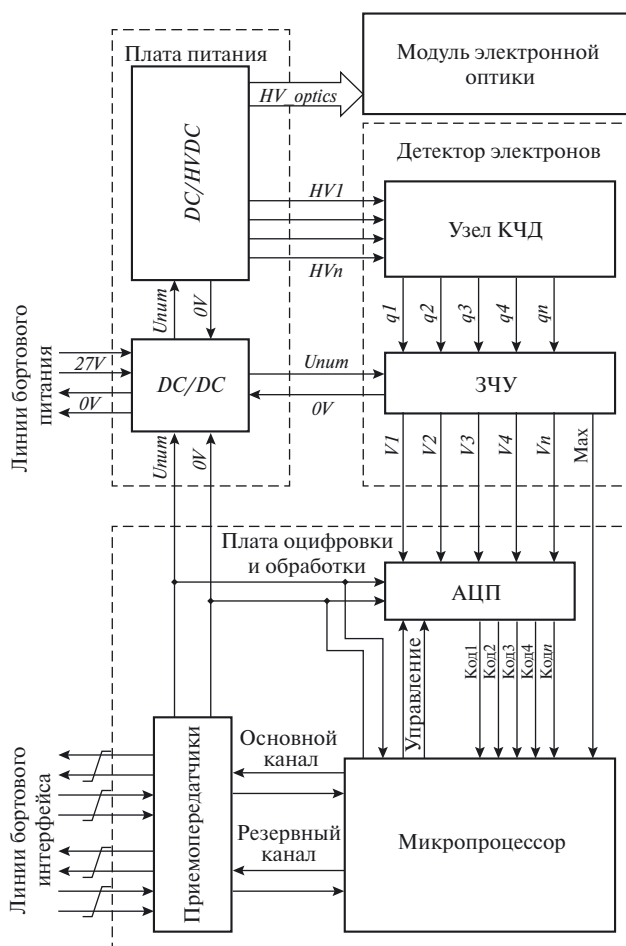


Рис. 3. Структурная схема модуля электроники «ТОТЭМ-Э».

основе шевронной сборки из трех микроканальных пластин МКП 56-15 производства Владикавказского технологического центра «Баспик». Для определения координаты прихода частицы на детектор применяется детектор типа клинья-полосы [15]. Конструкция детектора аналогична КЧД, предназначенному для использования в приборе «АРИЕС-Л» [16], за исключением организации питания детектора: для регистрации отрицательно заряженных частиц вход сборки МКП заземлен, а выход и анод находятся под положительным потенциалом относительно корпуса прибора. Структура детектора и внешний вид анода приведены на рис. 4.

Использование новой системы зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ) и АЦП позволило обеспечить максимальную скорость счета, обрабатываемую детектором, без потери данных на уровне $\sim 3 \cdot 10^5$ событий в секунду. Такое быстродействие детектора позволяет реализовать преимущества модуля электронной оптики в части одномоментной регистрации частиц с широким диапазоном энергий.

Одними из важных характеристик КЧД, от которых зависят аналитические свойства всего прибора, считаются равномерность регистрации частиц в зависимости от координаты и точность определения координаты прилета частицы. Для

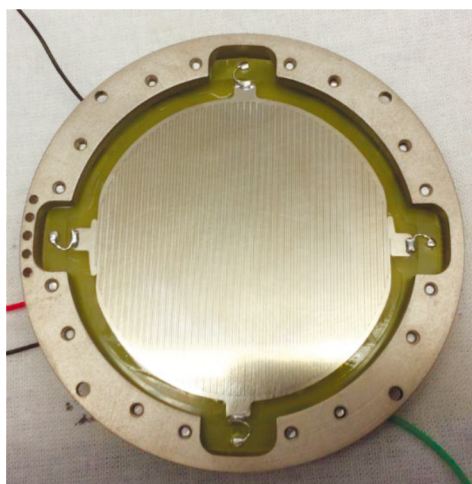
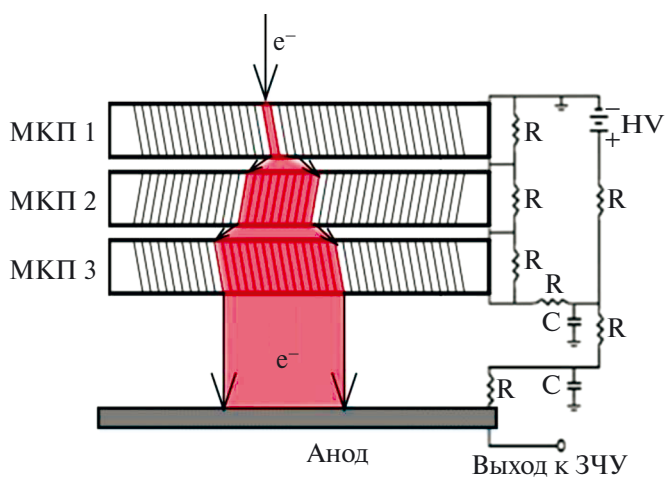


Рис. 4. Структура координатно-чувствительного детектора и фотография анода клинья-полосы, применяемого в детекторе.

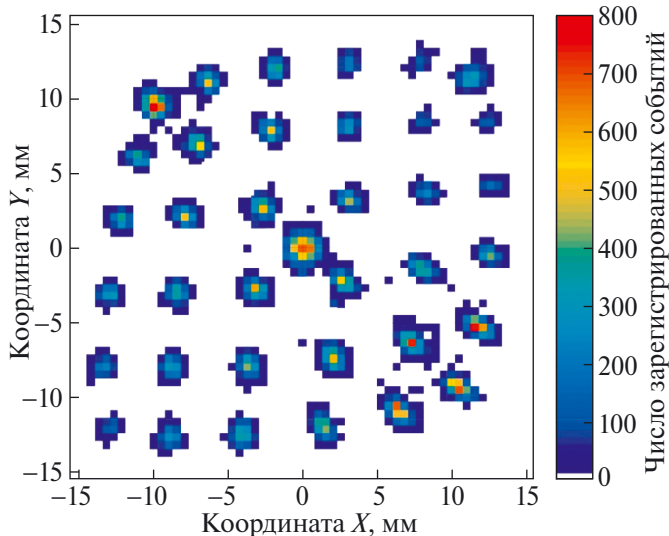
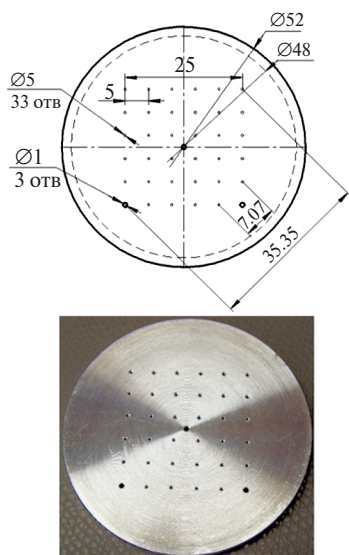


Рис. 5. Структура диафрагмы, использованной для определения пространственного разрешения детектора и распределения частиц по поверхности детектора.

определения этих параметров на входное окно КЧД устанавливалась специально разработанная диафрагма, представляющая собой совокупность отверстий диаметром 0.5 и 1 мм, после чего осуществлялось облучение детектора потоком электронов с энергиями от 1 кэВ, фиксировался счет детектора и координаты регистрируемых частиц. Структура диафрагмы, а также распределение частиц по поверхности детектора, полученное в результате этого эксперимента, приведены на рис. 5.

Проведенные испытания показали высокую точность при определении координаты прилета частицы на детектор (~ 0.5 мм) и хорошую равномерность при регистрации частиц в различных областях детектора. Наблюдаемые на рис. 5 неоднородности связаны с геометрическими особенностями применяемого анода и прокладкой кабелей к ЗЧУ и не оказывают влияния на аналитические характеристики прибора. Искажения изображения, вызванные особенностями детектора, будут приняты в расчет при разработке программного обеспечения для восстановления функции распределения частиц на основе результатов функциональных испытаний и калибровок.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИБОРОМ

Для спектрометра электронов «ТОТЭМ-Э» предусмотрено два режима работы: режим ожидания и режим измерения. В режим ожидания прибор переходит после коммутации питания. При этом функционирует только низковольтная часть прибора, формируются данные телеметрии, включая показания с датчиков температуры, расположенных в блоках электроники и на модуле электронной оптики.

Контроль температуры блоков электроники очень важен для корректной работы прибора, поскольку и высоковольтные источники питания, и детектор имеют ограниченный диапазон рабочей температуры. Поэтому в программное обеспечение прибора заложено аварийное отключение вторичных источников питания в случае, если показания термодатчиков выходят за границы допустимой температуры.

В режим измерения прибор переключается при подаче соответствующей команды со стороны блока управления космического аппарата или контрольно-испытательной аппаратуры. При этом становится возможным установка высоковольтного потенциала на детекторе и элементах электронной оптики. При включении режима измерения сначала происходит процесс

инициализации прибора — плавно повышается потенциал, подаваемый на МКП-детектор, поскольку скачкообразное повышение может привести к необратимому повреждению микроканальных пластин. После процедуры инициализации прибор готов к регистрации энергетического спектра частиц.

Для регистрации энергетического спектра частиц на элементы электронной оптики прибора подается потенциал, необходимый для регистрации частиц выбранного диапазона энергий. Значения потенциалов для различных диапазонов энергий хранятся в памяти прибора в виде рабочих таблиц. Память прибора позволяет хранить до 125 таблиц размером 128 ячеек. Каждая ячейка соответствует регистрируемому диапазону энергий и называется энергетической ступенькой. Вызов рабочей таблицы осуществляется подачей соответствующей команды. Этой же командой определяется время нахождения прибора на каждой ступеньке, номер начальной и конечной ступеньки, число повторений проходов по таблице.

Для снижения нагрузки на канал информационного обмена и уменьшения объемов передаваемой научной информации предусмотрен лимит для записи данных о координате прилета частицы на детектор на каждой энергетической ступеньке. Этот лимит может составлять 1000/2000/4000 частиц в зависимости от настроек прибора.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРА

Для наземных испытаний образцов прибора «ТОТЭМ-Э» создано рабочее место, включающее в себя вакуумную камеру с безмасляной системой откачки, оснащенную источником электронов, систему сбора и обработки информации, низковольтные и высоковольтные лабораторные источники питания, жидкостной криотермостат. Внутри вакуумной камеры расположена термоплита, предназначенная для размещения образцов прибора. Термоплита также оборудована манипулятором, обеспечивающим вращение прибора вокруг своей оси на 360° . Рабочее место аттестовано не только для проведения функциональных испытаний и физических калибровок образцов приборов, создаваемых для КНА-С, но и для проведения их термовакуумных испытаний в диапазоне температуры от -70 до $+70^\circ\text{C}$. Структура рабочего места показана на рис. 6.

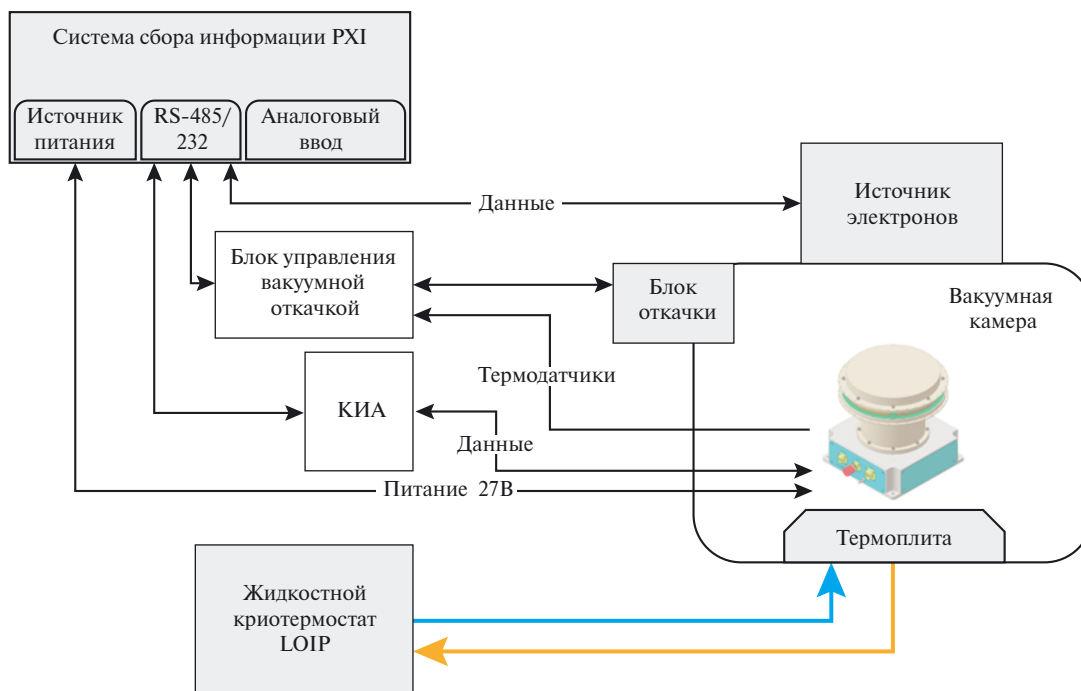


Рис. 6. Структура рабочего места для функциональных испытаний и физических калибровок прибора «ТОТЭМ-Э».

Система сбора и обработки информации, применяемая в данном рабочем месте, построена на базе шасси NI PXI-1085, оснащенного модулями источника питания 30 В, модулем аналогового ввода для подключения резистивных термодатчиков, модулями интерфейсов RS-485 и RS-232, используемыми для обеспечения обмена данными с блоком управления откачной системы, блоком электроники ионного источника и испытываемым образцом прибора.

Для управления составными частями рабочего места разработано специальное программное обеспечение, позволяющее выполнять тестирование образцов прибора, обеспечивая проверку поля зрения и энергетического разрешения как в ручном, так и в автоматизированном режиме работы.

Использование автоматизированных методов тестирования создаваемых научных приборов и их узлов позволяет сократить время, затрачиваемое на испытания, и при этом получить более детальную информацию об аналитических характеристиках прибора, что в ручном режиме затруднительно, а в ряде случаев и вовсе невозможно по причине большого числа контролируемых и изменяемых параметров.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКТОРСКО-ДОВОДОЧНОГО ОБРАЗЦА (КДО) ПРИБОРА

Для проверки схемотехнических решений, применяемых в приборе, и подтверждения достижимости заявленных аналитических характеристик, был разработан и изготовлен КДО прибора, полностью повторяющий штатный образец как в части механики, так и в части электронно-компонентной базы. Для подтверждения основных аналитических характеристик прибора были проведены функциональные испытания, позволившие определить следующие параметры:

- поля зрения прибора;
- угловое разрешение по азимутальным углам;
- одномоментно регистрируемый энергетический диапазон;
- энергетическое разрешение $\Delta E/E$.

Далее рассмотрим методику определения перечисленных параметров и приведем результаты лабораторных испытаний. В процессе испытаний прибор размещался в вакуумной камере и освещался потоком электронов различных энергий для набора азимутальных углов. Для каждого положения прибора фиксировался счет детектора и интенсивность потока электронов.

Поля зрения прибора

Проверка поля зрения прибора выполнялась для энергии частиц, находящихся в середине энергетического диапазона, одномоментно регистрируемого прибором. То есть поскольку согласно модели одномоментный энергетический интервал составляет от E_0 до $6E_0$, то проверка осуществляется на энергии $3E_0$. При проверке фиксировался счет детектора прибора для набора азимутальных углов от 0 до 355° с шагом 5° . Выполненная проверка показала, что поле зрения соответствует заявленному значению в 360° , за исключением четырех затенений, вызванных конструктивными элементами модуля электронной оптики.

Угловое разрешение по азимутальным углам

Определение величины углового разрешения по азимутальному углу проводилась с использованием данных, полученных в результате проверки поля зрения. В процессе проверки разрешения использовалось распределение для набора азимутальных углов $335, 0, 25, 65, 90, 115, 155, 180, 205, 245, 270, 295^\circ$. Допустимая точность установки полярного угла составляла 1° , энергия

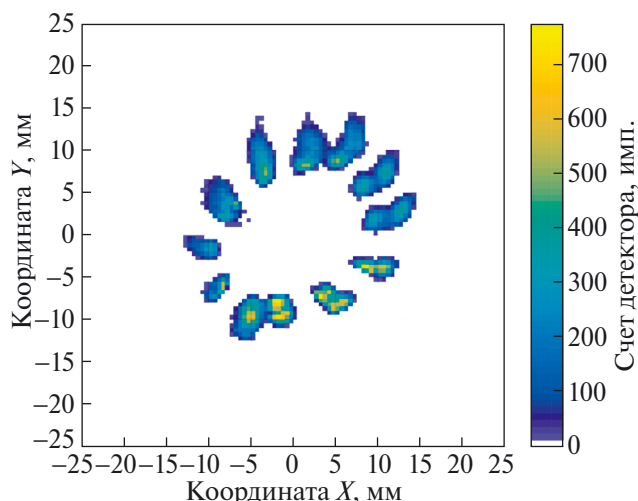


Рис. 7. Совокупное распределение частиц на детекторе прибора для набора азимутальных углов, использованных при определении углового разрешения прибора.

частиц — 1400 эВ. При этом рассматривалось распределение частиц на детекторе, как это показано на рис. 7. Анализ полученных данных показал, что угловое разрешение прибора соответствует заявленному: не хуже 30° .

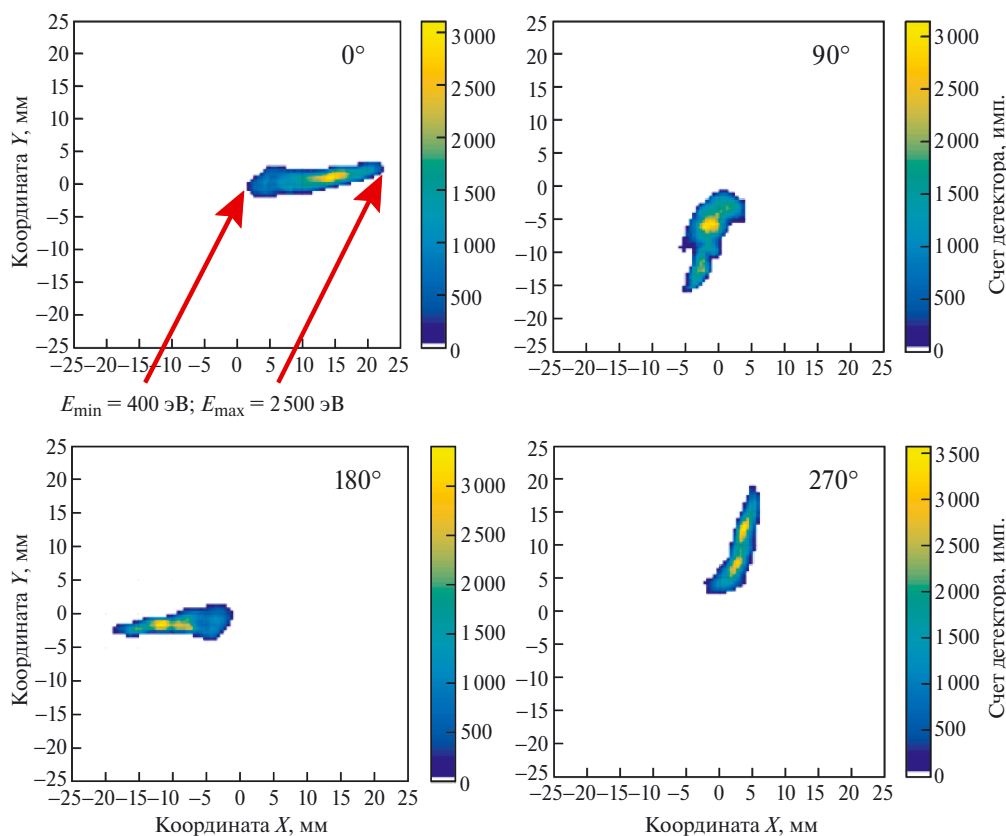


Рис. 8. Совокупные распределения частиц с энергиями от 400 до 2500 эВ, зафиксированные прибором для азимутов $0, 90, 180$ и 270° .

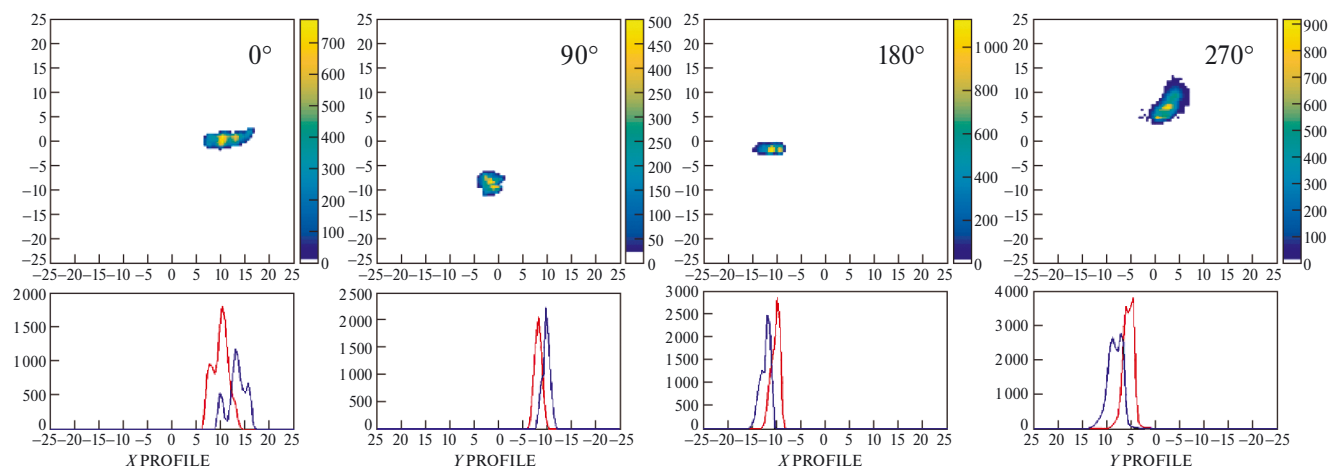


Рис. 9. Распределения частиц с энергиями 1400 и 1700 эВ, полученные для различных азимутальных углов.

Одномоментно регистрируемый энергетический диапазон и энергетическое разрешение

При проверке диапазона энергий, одномоментно регистрируемого прибором, на элементах модуля электронной оптики (МЭО) устанавливался постоянный потенциал, соответствующий средней энергии регистрируемых частиц ~ 600 эВ, а энергия электронов изменялась от нижней до верхней границы регистрируемой энергии с шагом 100 эВ. Данная проверка выполнялась для азимутальных углов $0, 90, 180$ и 270° . Проверка показала, что при потенциале 600 В минимальная энергия частиц, регистрируемых прибором, составляет 400 эВ, максимальная — 2500 эВ. Таким образом, диапазон одномоментно регистрируемых энергий составляет $6.5E_0$, где E_0 — минимальная энергия регистрируемых частиц для выбранных потенциалов на элементах электронной оптики. Совокупное распределение частиц различных энергий для четырех азимутальных углов приведено на рис. 8.

Энергетическое разрешение прибора было определено по данным, полученным на этапе проверки диапазона энергий, одномоментно регистрируемых прибором. При этом сравнивались изображения распределения частиц с различной энергией, зафиксированные для четырех азимутальных углов, и по этому распределению делались выводы об энергетическом разрешении прибора. Результаты сравнения распределения частиц приведены на рис. 9. Согласно проведенным испытаниям энергетическое разрешение прибора $\Delta E/E \leq 20\%$.

Проведенные функциональные испытания КДО «ТОТЭМ-Э» показали работоспособность предложенной электронно-оптической схемы, позволили провести апробацию выбранных

схемотехнических решений и применяемой электронно-компонентной базы и подтвердили достижимость заявленных аналитических и технических характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работ по космической миссии «Резонанс-МКА» был разработан, изготовлен и испытан конструкторско-доводочный образец спектрометра электронов «ТОТЭМ-Э». КДО «ТОТЭМ-Э» повторяет штатный прибор в части применяемых компонентов и программного обеспечения. Механическая часть электронно-оптической схемы образца также полностью соответствует штатной конфигурации прибора.

Конструкция электронно-оптической схемы спектрометра «ТОТЭМ-Э» обеспечивает одномоментную регистрацию частиц в широком диапазоне энергий от E_0 до $\sim 6.5E_0$ с круговым полем зрения $360 \times 5^\circ$, за исключением затенения поля зрения элементами электронной оптики. Предложенная электронно-оптическая схема позволяет существенно увеличить скорость регистрации спектра частиц с высоким энергетическим и угловым разрешением и тем самым повысить достоверность получаемой научной информации. Это даст возможность проводить более детальные исследования процессов, происходящих в магнитосфере Земли, получить новые научные данные о характере взаимодействия волн и частиц, исследовать характер влияния солнечной активности на магнитосферу, в том числе и в полярных областях.

Для КДО спектрометра были проведены функциональные испытания, позволившие подтвердить достижимость заявленных аналитических

характеристик и уточнить ряд технических параметров прибора. Функциональные испытания включали в себя проверку следующих параметров: определение относительного пропускания модуля электронной оптики прибора для набора азимутальных углов; проверку поля зрения прибора; проверку углового разрешения по азимутальным углам; проверку энергетического диапазона и энергетического разрешения. Ниже приведены аналитические и технические характеристики конструкторско-доводочного образца прибора, определенные по результатам испытаний:

- энергетический диапазон: 150 эВ — 30 кэВ;
- энергетическое разрешение: до 20%;
- поле зрения прибора $360 \times 5^\circ$;
- угловое разрешение $\sim 25^\circ$;
- габаритные размеры: $190 \times 170 \times 170$ мм;
- вес: не более 3.5 кг;
- энергопотребление: не более 4.0 Вт.

Важным результатом работ по испытанию и настройке прибора представляется создание аппаратно-программного комплекса, позволяющего в автоматизированном режиме проводить проверку параметров функционирования испытываемого образца прибора. Применение методов автоматизированного тестирования существенно ускоряет процесс отладки электронно-оптической схемы прибора и облегчает процедуру определения аналитических характеристик прибора.

Накопленный в результате работ над КДО «ТОТЭМ-Э» опыт будет использован при создании штатного образца прибора и позволит сократить время на технологические операции и процессы, связанные с отладкой функционирования электронно-оптической схемы прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Louarn P., Roux A., de Feraudy H. et al.* Trapped electrons as a free energy source for the auroral kilometric radiation // *J. Geophysical Research*. 1990. V. 95. Iss. A5. P. 5983–5995. <https://doi.org/10.1029/JA095iA05p05983>
2. *Lindqvist P.A., Marklund G.T.* A statistical study of high-altitude electric fields measured on the Viking satellite // *J. Geophysical Research*. 1990. V. 95. Iss. A5. P. 5867–5876. <https://doi.org/10.1029/JA095iA05p05867>
3. *Mozer F.S., Temerin M.* Solitary waves and double layers as the source of parallel electric fields in the auroral acceleration region // *High-latitude space plasma physics* / ed. B. Hultqvist, T. Hagfors. N.Y.: Plenum Press, 1983. P. 453.
4. *Bostrem R., Gustafsson G., Holback B. et al.* Characteristics of solitary waves and weak double layers in the magnetospheric plasma // *Physical Review Letters*. 1988. V. 61. P. 82–85. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.82>
5. *Temerin M., Lysak R.* Electromagnetic ion cyclotron mode (ELF) waves generated by auroral electron precipitation // *J. Geophysical Research*. 1984. V. 89. Iss. 5. P. 2489–2859. <https://doi.org/10.1029/JA089iA05p02849>
6. *Gustafsson G., Andre M., Matson L. et al.* On waves below the local proton gyrofrequency in auroral acceleration regions // *J. Geophysical Research*. 1990. V. 95. Iss. A5. P. 5889–5904. <https://doi.org/10.1029/JA095iA05p05889>
7. *Hasegawa A., Uberoi C.* The Alfvén wave / DOE Critical Review Series. 1982. DOE/TIC-11197. <https://doi.org/10.2172/5259641>
8. *Goertz C.K.* Electron acceleration via kinetic Alfvén waves // *Comparative Study of Magnetospheric Systems* // *Proc. Intern. Colloquium “Comparative study of magnetospheric systems”*. Londe-les-Maures, France, Sept. 9–13, 1985. Toulouse: Cepadues-Editions, 1986. P. 357–370.
9. *Volokitin A.S., Dubinin E.M.* The turbulence of Alfvén waves in the polar magnetosphere of the Earth // *Planetary and Space Science*. 1989. V. 37. Iss. 7. P. 761–765. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(89\)90127-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90127-X)
10. *Lutsenko V.N., Kudela K.* Almost monoenergetic ions near the Earth’s magnetosphere boundaries // *Geophysical Research Letters*. 1999. V. 26. P. 413–416.
11. *Lutsenko V.N.* Almost monoenergetic ions: New support for Alfvén ideas on the role of electric currents in space plasmas? // *Physics and Chemistry of the Earth. Pt. C: Solar, Terrestrial and Planetary Science*. 2001. V. 26. Iss. 8. P. 615–619. [https://doi.org/10.1016/S1464-1917\(01\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S1464-1917(01)00057-5)
12. *Kudela K., Lutsenko V.N., Sarris E.T. et al.* DOK-2 ion fluxes upstream from the bow shock: characteristics from 4 years of Interball-1 measurements // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. Iss. 1–3. P. 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.029>
13. *Slivka M., Kudela K.* Anisotropy of proton fluxes in neutral sheet region measured by DOK2 on Interball-1 // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. Iss. 1–3. P. 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.047>
14. *Lutsenko V.N., Kirpichev I.P., Grechko T.V. et al.* Source positions of energetic particles responsible for the fine dispersion structures: numerical simulation results // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. Iss. 1–3. P. 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.053>
15. *Martin C., Jelinsky P., Lampton M. et al.* Wedge-and-strip anodes for centroid-finding position-sensitive photon and particle detectors // *Review of Scientific Instruments*. 1981. V. 52. Iss. 7. P. 1067–1074. <https://doi.org/10.1063/1.1136710>
16. *Вайсберг О.Л., Журавлев Р.Н., Моисеенко Д.А. и др.* Широкоугольный ионный энерго-масс-анализатор АРИЕС-Л // *Астрон. вестн.* 2021. Т. 55. № 6. С. 575–588. <https://doi.org/10.31857/S0320930X21060116>