

УДК 520.644.07

## НОВЫЙ СПЕКТРОМЕТР ULTIMAN ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

© 2023 г. О. Л. Вайсберг<sup>a, \*</sup>, С. Д. Шувалов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*E-mail: olegv@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 07.10.2022 г.

После доработки 20.12.2022 г.

Принята к публикации 04.01.2023 г.

Измерение распределения скоростей ионов является одной из основных целей исследований космической плазмы. Существует множество ионных и электронных спектрометров (см., например, Wüest и др., 2007; Young и др., 2007; Zurbuchen, Gershman, 2016; Vaisberg и др., 2016). Наиболее часто используемым ионным спектрометром является анализатор top-hat (Carlson др., 1983), состоящий из тороидального электростатического анализатора, электростатического сканера и времяпролетной секции с тонкой фольгой в качестве пускового элемента и предварительного ускорения ионов. В данной работе описывается новый энерго-масс анализатор с электростатическим сканером, обеспечивающим полусферическое поле зрения с малой абберрацией, с тороидальным электростатическим анализатором и с времяпролетным синхронизатором с электрическим затвором. Он обеспечивает желаемое сканирование полусферы, широкий диапазон энергий и разрешение по массе, обеспечивающее решение большинство задач в области космических исследований. Он может обеспечить детальные измерения распределения ионных частиц по скоростям без значительных промежутков для получения структуры потока горячей плазмы. С помощью простых электрооптических элементов этот анализатор может быть легко модифицирован для многих целей исследований плазмы.

**Ключевые слова:** анализатор заряженных частиц, энерго-масс спектрометр, анализатор космической плазмы

DOI: 10.31857/S0320930X23030106, EDN: BSBYME

### ВВЕДЕНИЕ

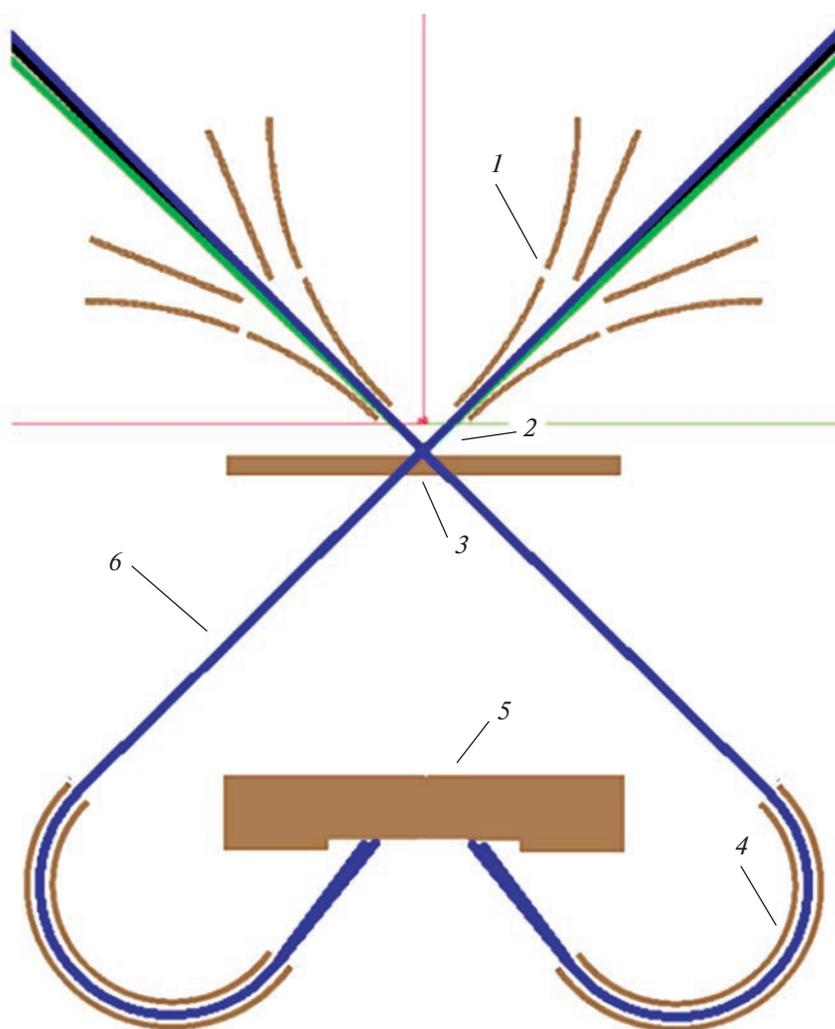
Измерения космической плазмы являются важным инструментом исследований Солнечной системы, включая солнечный ветер, его взаимодействие с планетами и другими телами Солнечной системы, планетарные магнитосферы и их потери и т.д. Наиболее часто используемым прибором для измерений горячей плазмы в космосе является ионный спектрометр top-hat (Carlson и др., 1983) с обзором полусферы и скромным разрешением по массе. Одним из преимуществ этого инструмента является его многолетнее наследие, которое побуждает космические агентства оказывать поддержку командам, использующим этот прибор.

Для некоторых космических проектов требуется разрабатывать специализированный анализатор плазмы. К таким примерам можно привести (1) ионный спектрометр PLASTIC для проекта STEREO, который измеряет спектры ионов с

помощью трех методов: электростатического анализа, анализа времени пролета и полной энергии (Galvin и др., 2008); (2) набор из восьми сравнительно простых анализаторов на быстро вращающихся космических аппаратах в проекте MMS для измерения распределения скоростей ионов и электронов с чрезвычайно высоким временным разрешением (Pollock, 2016); (3) энерго-масс анализатор с полем зрения  $2\pi$ , обеспечивающий одномоментное измерение сечения потока ионов с конкретным отношением энергии на заряд  $E/q$  в полушарии и последовательным сканированием по отношению  $E/q$  (Vaisberg и др., 2016).

### ОПИСАНИЕ

Схема нового энерго-масс анализатора показана на рис. 1. Это поперечное сечение цилиндрической модели SIMION (Manura, Dahl, 2008), включающей многоэлектродный угловой сканер 1, входное окно 2 с запорным электродом 3, торои-



**Рис. 1.** Модель анализатора с использованием модели SIMION. 1 – угловой сканнер, 2 – входное коническое окно с коническим электродом 3, 4 – тороидальный анализатор, 5 – микроканальный детектор, 6 – траектории проходящих ионов.

дальный электростатический анализатор 4, микроканальный детектор 5 и траектории ионов 6. Траектории показаны для конуса обзора 45°, когда потенциалы на электродах сканера равны 0. Показанный пучок состоит из ионов, покрывающих все скоростное пространство анализатора. Параметры модели соответствуют микроканальному детектору (МСП) с диаметром чувствительной области 27 мм.

Входом анализатора является коническое отверстие 2 с конусом 3. Этот конус является элементом входного отверстия, определяющего ионный пучок, который поступает в электростатический анализатор. В режиме массового анализа конус находится под потенциалом, который направляет ионы во вход в тороидальный электростатический анализатор (ESA). Выбранный импульс на конусе генерирует короткий ионный пучок для времяпролетного режима анализатора.

Ионный пучок 6 поступает в тороидальный анализатор 4, который выбирает ионы с энергией на заряд,  $E/q$ , определяемый геометрией анализатора и потенциалами, приложенными к его электродам. Выбранные ионы подсчитываются детектором МСП 5. Сканирующая система 1 выбирает угол конуса ионов, выбранный анализатором. Изменение напряжений, подаваемых на электроды сканера, позволяет анализировать поток ионов внутри полусферы (рис. 2).

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Для определения физических параметров энерго-масс анализатора было проведено компьютерное моделирование с ионами, запускае-

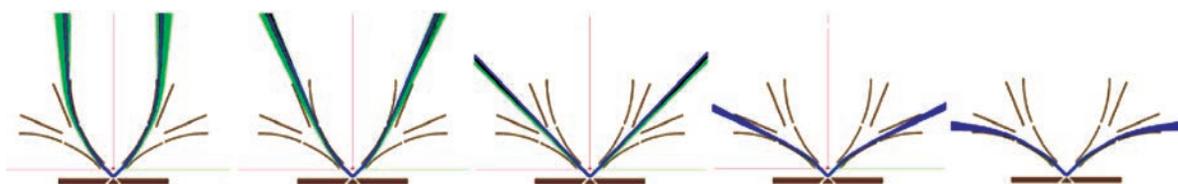


Рис. 2. Работа сканирующей системы, обеспечивающей обзор полусферы.

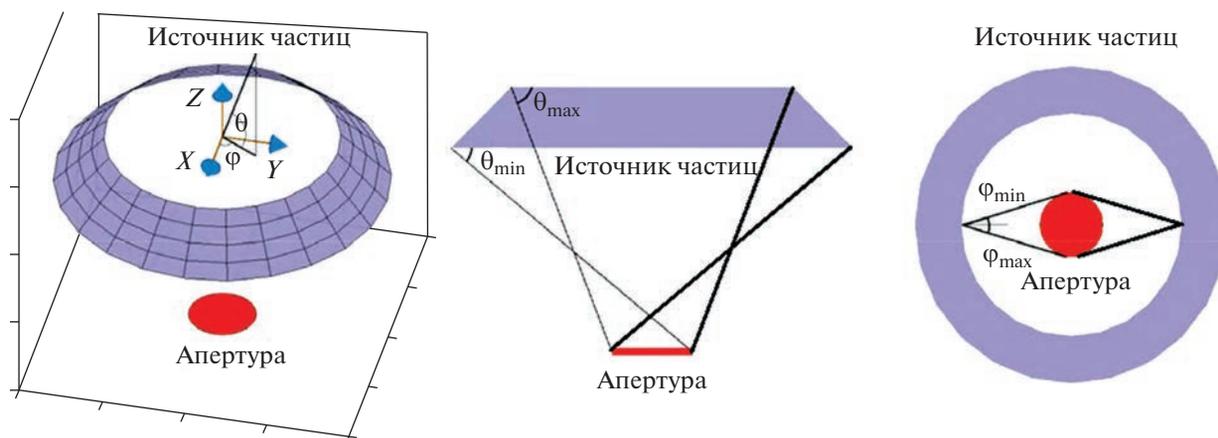


Рис. 3. Начальные условия для генерируемых частиц. Размеры не подлежат масштабированию.

мыми с поверхности на некотором расстоянии выше по потоку от апертуры прибора, показанной на рис. 3. Эта поверхность представляла собой усеченный конус (рис. 3). Энергия, начальная скорость и направление движения частиц имели случайные равномерные распределения по диапазонам  $\Delta E = E_{\max} - E_{\min}$ ,  $\Delta\theta = \theta_{\max} - \theta_{\min}$ ,  $\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$ , где  $E$  – энергия,  $\theta$  – полярный угол и  $\varphi$  – азимут. Значения  $E_{\max}$ ,  $E_{\min}$ ,  $\theta_{\max}$ ,  $\theta_{\min}$ ,  $\varphi_{\max}$ ,  $\varphi_{\min}$  были созданы, чтобы покрыть всю энергию и угловой диапазон частот прибора. Обратите внимание, что поверхность, на которой образуются частицы, а также значения  $\theta_{\max}$  и  $\theta_{\min}$  уникальны для каждого состояния отклонения электростатического сканера.

Моделирование было выполнено для состояния отклонения электростатического сканера на  $45^\circ$ , когда на отклоняющих электродах были нулевые потенциалы. Параметры моделирования:  $E_{\min} = 980$  эВ,  $E_{\max} = 1110$  эВ,  $\theta_{\min} = 43^\circ$ ,  $\theta_{\max} = 47^\circ$ ,  $\Delta\varphi = 6^\circ$ . Количество сгенерированных частиц  $N_{\text{in}} = 2 \times 10^6$  было установлено достаточным для того, чтобы ошибка моделирования составляла менее 0.05%.

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Распределение энергии  $C = 54459$  ионов, достигших детектора, показано на рис. 4. Полная

ширина распределения при половинном максимуме составляет  $\Delta E = 62$  эВ, что для максимального положения пика  $E = 1038$  эВ дает энергетическое разрешение, очень близкое 6%.

### ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ФАКТОР

Уравнение для геометрического коэффициента для одиночной энергии и угловой ячейки (без учета негеометрических эффектов, таких как эффективность обнаружения и прозрачность сеток) выглядит следующим образом:

$$CF = S\Omega \frac{C}{N_{\text{in}}} \frac{\Delta E}{E},$$

где  $GF$  – геометрический фактор прибора,  $S$  – площадь поверхности, через которую проходят частицы, а  $\Omega$  – телесный угол, наблюдаемый из апертуры прибора, и отношение  $\frac{\Delta E}{E}$  – конкретное соотношение, учитывающее полосу пропускания анализатора.

Для  $\theta = 45^\circ$ , выбранная поверхность для генерации частиц составляет  $83 \text{ см}^2$ . Это приводит к величине

$$S\Omega = S \int_0^{6^\circ} \int_{43^\circ}^{47^\circ} \sin\theta d\theta d\varphi \approx 0.429 \text{ см}^2 \text{ ster.}$$

В приведенной модели

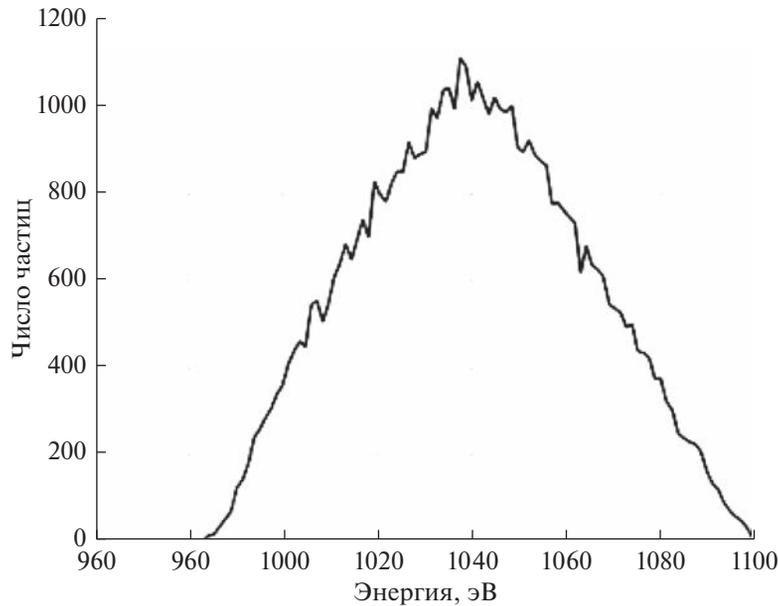


Рис. 4. Профиль энергетической полосы прибора.

$$\frac{C}{N_{in}} = 2.72 \times 10^{-2}$$

и

$$\frac{\Delta E}{E} = 6\%$$

Для анализатора мы получаем:

$$GF = 6.73 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}^2 \text{ step eV}}{\text{eV}}$$

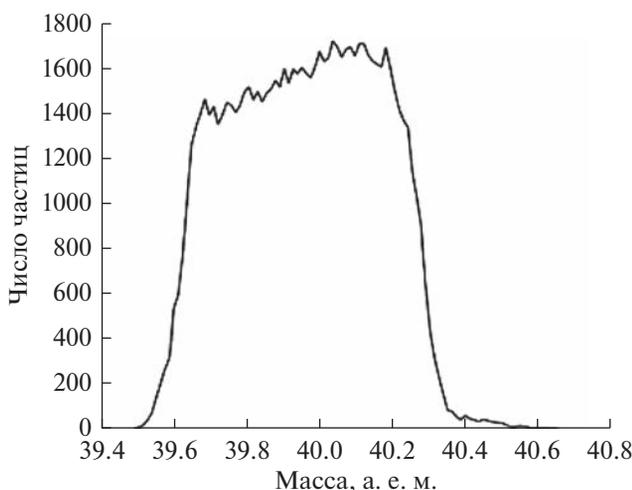


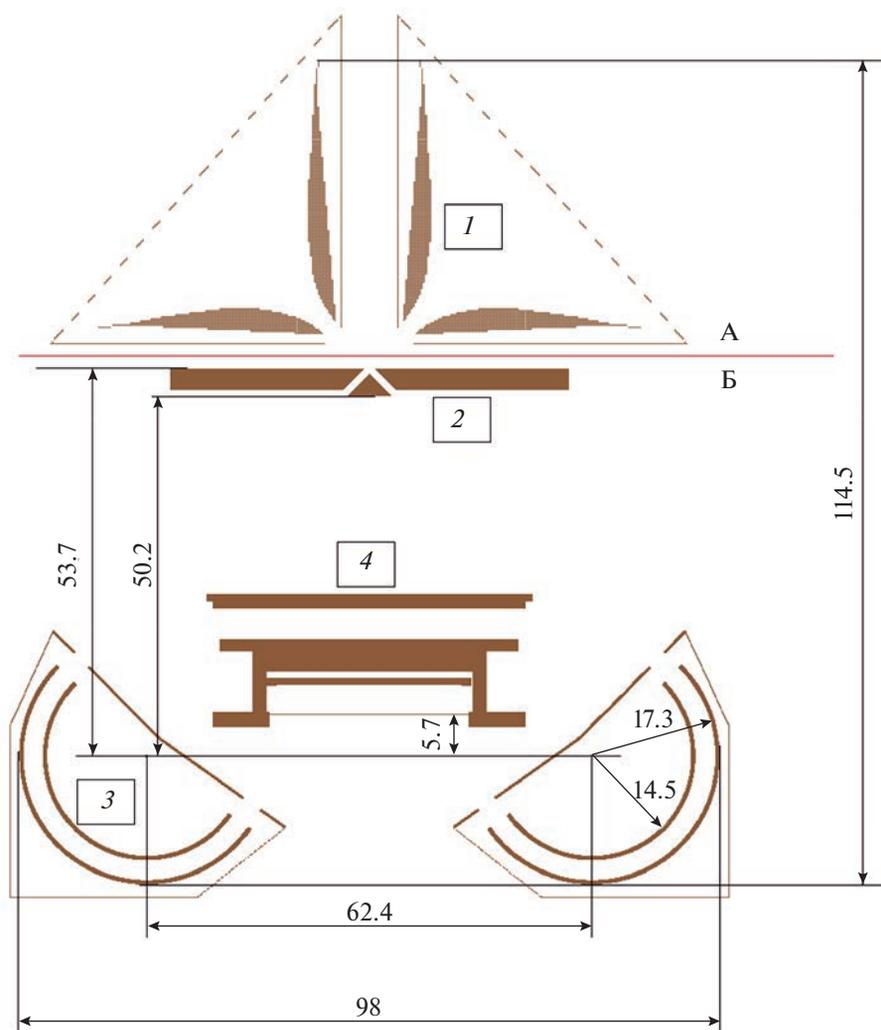
Рис. 5. Гистограмма TOF части частиц с массой 40 а. е. м., которые достигли детектора. Шкала времени преобразуется в шкалу массы.

### МАССОВОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Чтобы оценить массовое разрешение прибора на основе компьютерного моделирования, пучок частиц с массой 40 а. е. м. был запущен из затвора в направлении детектора. Начальная энергия и направление частиц были равномерно распределены в диапазонах, достаточно широких, чтобы охватить всю полосу пропускания прибора. Время полета (TOF)  $t$  каждой частицы, достигшей детектора, регистрировалось в момент ее достижения модельного детектора. Затем была построена гистограмма зарегистрированного времени полета частиц (см. рис. 5), где шкала времени была преобразована в шкалу массы в соответствии с правилом  $m = kt^2$ , где  $m$  – масса частицы, а  $k$  – экспериментально рассчитанный коэффициент. Результирующее разрешение по массе составляет  $m/\Delta m \approx 57$ , где  $\Delta m$  – полная ширина в половине максимума пика на рис. 5.

### ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПИСАННОГО ПРИБОРА

Рассмотренный анализатор ионов может быть использован для исследования солнечного ветра и внешних плазменных оболочек объектов Солнечной системы. С учетом ограничения полезной нагрузки исследовательских аппаратов такой прибор будет иметь небольшую массу, что требует высокой точности в изготовлении элементов электронной оптики.



**Рис. 6.** Общая схема электронной оптики ULTIMAN. А – сканирующий модуль, Б – энерго-масс анализатор; 1 – угловой сканер, 2 – диафрагма с затвором, 3 – ЭСА, 4 – координатно-чувствительный детектор. Все размеры указаны в миллиметрах.

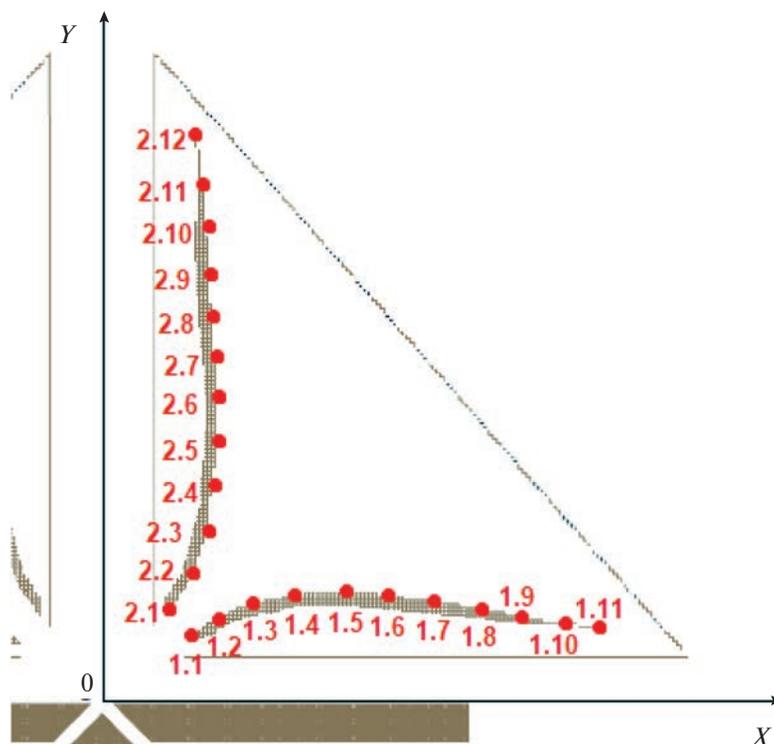
*Структура электронной оптики*

Прибор является энерго-масс анализатором, предназначенным для измерения отношения энергии к заряду,  $E/q$ , и скорости  $V$  ионов.

Основные элементы оптико-электронной схемы отмечены на рис. 6. Диапазон потенциалов, подаваемых на электроды электронно-оптической схемы, приведены в табл. 2 и 3.

**Таблица 1.** Относительное расположение реперных точек на поверхности электродов сканера

Размеры электрода 2	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12	
X, мм	6.45	8.42	10.08	12.36	14.51	16.73	20.42	24.86	29.29	33.48	37.80	–	
Y, мм	4.92	6.30	7.04	7.72	8.15	8.33	8.27	7.66	7.04	6.18	5.77	–	
Размеры электрода 1		2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10	2.11	2.12
X, мм		4.76	6.76	7.72	8.03	8.44	8.35	8.52	8.20	7.95	7.74	7.50	7.12
Y, мм		6.55	9.77	12.57	15.16	18.21	21.28	25.54	28.24	31.97	35.91	39.51	42.55



**Рис. 7.** Размеры и относительное положение элементов сканера и защитной сетки. Расстояние между защитным экраном и элементами сканера отсчитывается от внешней поверхности электрода.

Угловой сканер предназначен для селекции ионов по углам путем подачи положительного потенциала на электроды. Угловой сканер и энерго-масс измерительный модуль могут быть испытаны раздельно.

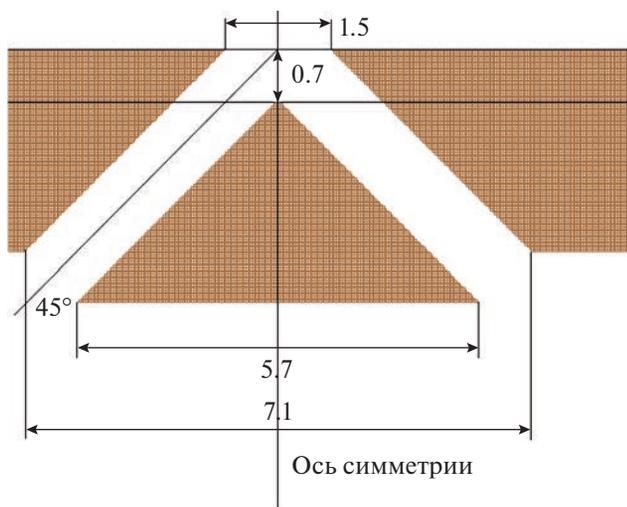
*Угловой сканер*

Сканер, состоящий из отклоняющих частицы электродов, является жесткой сборкой на проводящей плите, монтируемой на диафрагме с гейтом (рис. 7). Форма обкладок сканера задана ломаной линией в осесимметричном сечении, координаты точек которой приведены в табл. 1. Толщина обкладок сканера должна выбираться с учетом необходимости соблюдения осесимметричной формы и сохранения зазора между обкладками.

Для экранирования поля сканера частиц на его входе устанавливается проводящая сетка. Форма этого защитного экрана приведена на рис. 7.

*Диафрагма с гейтом*

Гейт представляет собой металлический электрод, закрепленный в плоскости диафрагмы, предназначенный для предотвращения пролета частиц в энерго-масс измерительный модуль при подаче на него потенциала. Размеры указаны на рис. 8. Гейт предназначен для периодического за-  
пираия пролета ионов в ЭСА путем подачи положительного потенциала на электрод.



**Рис. 8.** Размеры элементов гейта. Все размеры указаны в миллиметрах.

*Электростатический анализатор и детектор*

Электростатический анализатор (ЭСА) представляет собой систему двух концентрических тороидальных электродов разных радиусов. Угол развертки составляет  $180^\circ$ . ЭСА предназначен для разделения ионного пучка по соотношению  $E/q$ . При этом внутренняя обкладка ЭСА заземлена, а внешняя обкладка ЭСА находится под положительным потенциалом. Геометрические характеристики обкладок ЭСА приведены на рис. 9. Размеры указаны для внутренних поверхностей. В данном варианте прибора в качестве детектора может использоваться микроканальный детектор МСР с диаметром 25 мм.

*Требования к гейту*

В табл. 2 ниже приведены желательные параметры электроники гейта. Указано минимальное напряжение для закрытия гейта, допускается большее значение потенциала на электроде гейта.

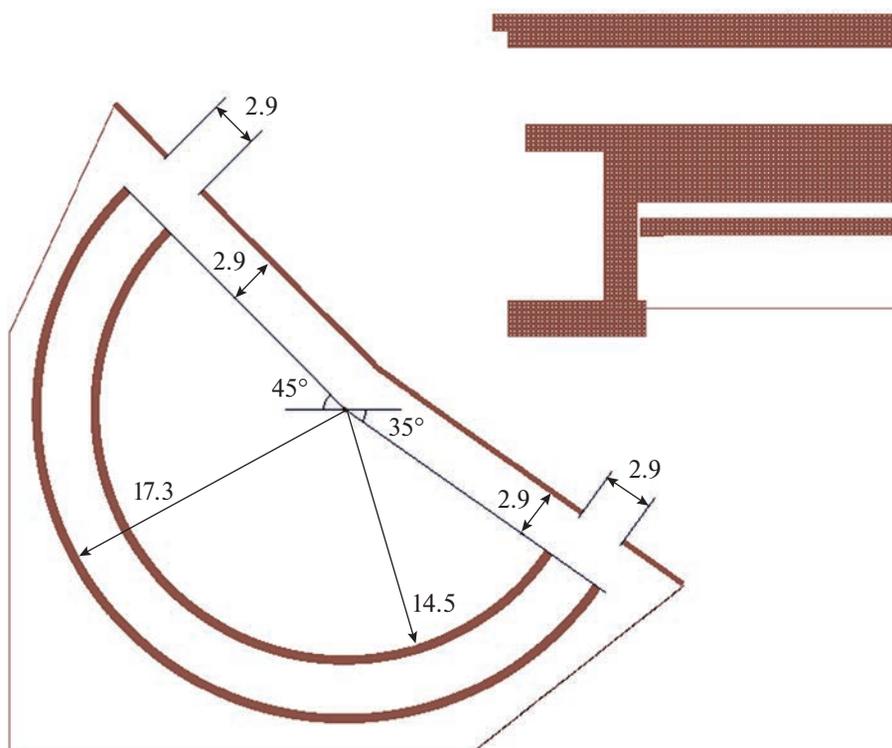
Надо учесть, что задание меньшего времени открытия гейта, чем то, что указано в табл. 2, приведет к снижению чувствительности прибора; увеличение этого времени приведет к снижению массового разрешения.

*Потенциалы на электродах***Таблица 2.** Параметры электроники гейта

Энергия частиц	5 эВ	1 кэВ	30 кэВ
Минимальное напряжение для закрытия гейта, В*	0.14	28.2	846
Время открытого гейта, мкс, не более**	0.879	0.062	0.011
Период открытия гейта, мкс, не менее**	29.07	2.06	0.37

\* Данный параметр прямо пропорционален измеряемой энергии частиц.

\*\* Данный параметр обратно пропорционален корню из энергии измеряемых частиц.

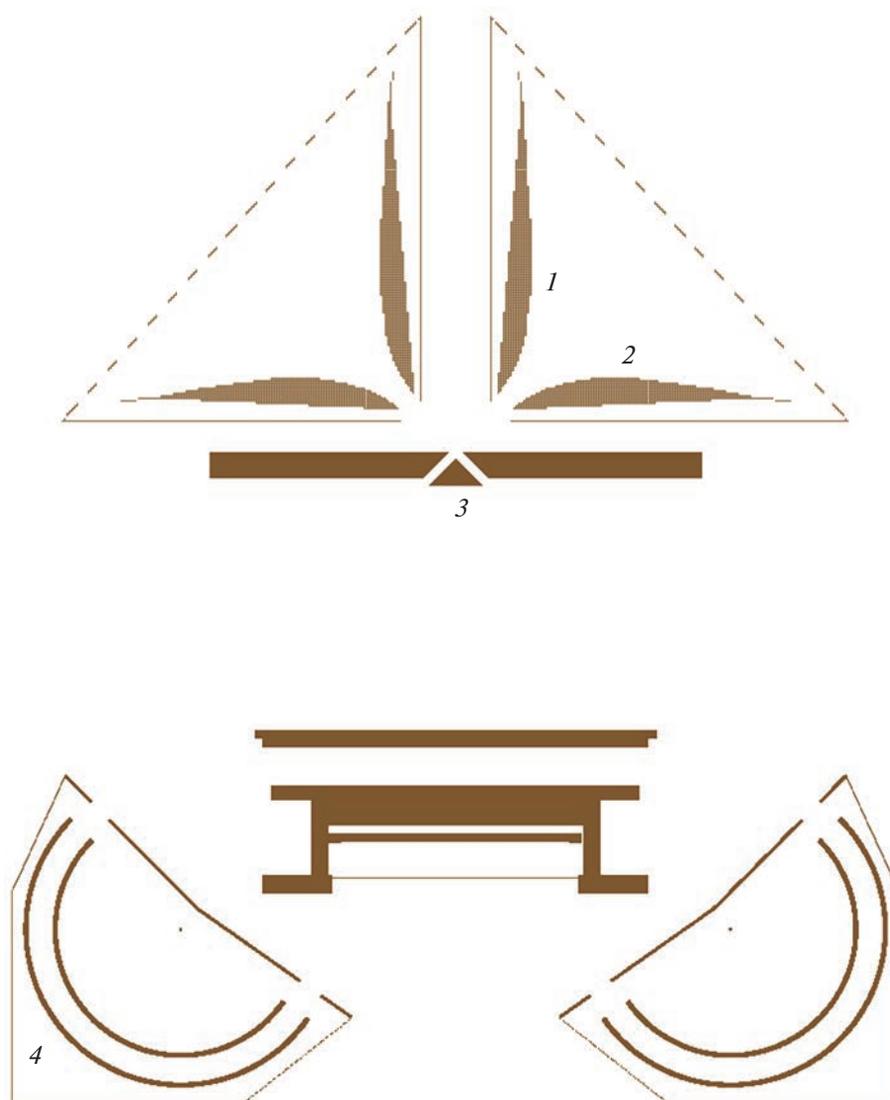


**Рис. 9.** Размеры элементов электростатического анализатора. Размеры указаны для внутренних поверхностей. Все размеры указаны в миллиметрах.

**Таблица 3.** Диапазон принимаемых значений потенциалов на элементах оптики, обозначенных на рис. 10, для регистрации частиц различных энергий. Потенциалы на электродах линейно зависят от измеряемой энергии. Значения потенциалов могут быть скорректированы по результатам испытаний образцов прибора

Измеряемая энергия	Точность задания потенциала, %	5 эВ		50 эВ		1 кэВ		30 кэВ	
		от, В	до, В	от, В	до, В	от, В	до, В	от, В	до, В
1	2.5	0	2.926	0	29.264	0	585	0	17550
2	2.5	0	2.273	0	22.733	0	455	0	13650
3	—	0	0.14*	0	1.41*	0	28.2*	0	846*
4	2.5	1.55	1.55	15.5	15.5	310	310	9300	9300

\* Допускается большее значение потенциала.



**Рис. 10.** Нумерация электродов: 1–2 – элементы сканера заряженных частиц, 3 – гейт, 4 – ЭСА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный энерго-масс анализатор может стать “рабочей лошадкой” для космических миссий, предназначенных для изучения взаимодействия солнечного ветра с телами Солнечной системы и планетарной плазмой. Он может обеспечить полное трехмерное пространственное распределение скоростей ионов с адекватным диапазоном энергий (~3 эВ–30 кэВ) и массовым разрешением, достаточным для анализа как частиц солнечного ветра, так и ионов планетного или кометного происхождения. Ожидаемая масса прибора с небольшим количеством электрооптических элементов относительно невелика (в пределах 2 кг для одного полусферического анализатора FOV и ~3 кг для двух полусферических анализаторов с одним электронным блоком). Электрооптика спектрометра позволяет расширить поле зрения более чем на 3π, обеспечивая достаточный обзор для многих применений. Исходная модель, описанная в этой рукописи, предполагает дальнейшее уточнение. Описанная электрооптика может быть также использована для электронного спектрометра с меньшей массой, поскольку она не требует возможности массового разрешения и в большинстве случаев благодаря более высокому потоку электронов. Результаты лабораторных модельных испытаний будут вскоре представлены для публикации в научной литературе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Carlson C.W., Curtis D.W., Paschmann G., Michael W.* An instrument for rapidly measuring plasma distribution functions with high resolution // *Adv. Space Res.* 1983. V. 2. № 7. P. 67–70.
- Galvin A.B., Kistler L.M., Popecki M.A., Farrugia C.J., Simunac K.D.C., Ellis L., Möbius E., Lee M.A., Boehm M., Carroll J., Crawshaw A., Conti M., Demaine P., Ellis S., Gaidos J.A., и др.* The Plasma and Suprathermal Ion Composition (PLASTIC) investigation on the STEREO observatories // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 136. № 1–4. P. 437–486.
- Manura D.J., Dahl D.A.* SIMION // Scientific Instrument Services, Inc. Idaho National Laboratory, Revision, 2008.
- Pollock C., Moore T., Jacques A., Burch J., Gliese U., Saito Y., Omoto T., Avakov L., Barrie A., Coffey V., Dorelli J., Gershman D., Giles B., Rosnack T., Salo C. и др.*, Fast plasma investigation for Magnetospheric Multiscale // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 199. № 1–4. P. 331–406. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0245-4>
- Vaisberg O., Berthelier J.-J., Moore T., Avakov L., Leblanc F., Leblanc F., Moiseev P., Moiseenko D., Becker J., Collier M., Laky G., Keller J., Koynash G., Lichtenneger H., Leibov A., Zhuravlev R., Shestakov A., Burch J., McComas D., Shuvailov S., Chornay D., Torkar K.* The 2π charged particles analyzer: All-sky camera concept and development for space missions // *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 11.750–11.765. <https://doi.org/10.1002/2016JA022568>
- Wüest M.D., Evans S., McFadden J.P., Kasprzak W.I., Brace L.H., Dichter B.K., Hoegy W.R., Lazarus A.J., Masson A., Vaisberg O.* Review of Instruments // Calibration of Particle Instruments in Space Physics / Eds Wüest M., Evans D.S., von Steiger R. ISSI Scientific Report SR-007. 2007. 11–116 pp.
- Young D.T., Nordholt J.E., Burch J.L., McComas D.J., Bowman R.P., Abeyta R.A., Alexander J., Baldonado J., Barker P., Black R.K., Booker T.L., Casey P.J., Cope L., Crary F.J., Cravens J.P. и др.* Plasma Experiment for Planetary Exploration (PEPE). *Space Sci Rev* 129, 327–357 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11214-007-9177-3>
- Zurbuchen T.H., Gershman D.J.* Innovations in plasma sensors // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121. № 4. P. 2891–2901. <https://doi.org/10.1002/2016JA022493>