Новый миниатюрный масс-спектрометр для метеорологических спутников

© А.Г. Кузьмин, Ю.А. Титов

Институт аналитического приборостроения РАН,
198095 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: agqz55@rambler.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 14 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Предложен вариант компактного масс-спектрометра для космических исследований. Представлены результаты расчета ионно-оптической схемы прибора, а также приведены результаты моделирования работы анализатора для нескольких газов в программе SIMION. Рассмотренный масс-спектрометр предлагается как альтернатива устанавливаемому в настоящее время на метеоспутниках радиочастотному масс-спектрометру РИМС-М.

Ключевые слова: масс-спектрометрия, космические исследования.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64037.297-26

В космических исследованиях масс-спектрометрические методы используются для исследования состава верхних слоев атмосферы Земли. При этом предъявляются следующие требования к масс-спектрометру:

– малые габариты и вес для возможности размещения на борту носителя;

– устойчивость к механическим перегрузкам и вибрации;

– высокая чувствительность и широкий динамический диапазон;

– диапазон масс, определяемый составом атмосферы (1–50 Da);

– умеренная разрешающая способность (достаточно 1 Da);

– малая длительность развертки спектра для достижения локальности измерения при высокой скорости носителя;

– стабильность характеристик, в том числе при температурных воздействиях и хранении при атмосферном давлении.

В зарубежных космических исследованиях масс-спектрометры стали применять с середины 60-х годов, изначально это были секторные приборы, а также впоследствии хромато-масс-спектрометры с секторным анализатором [1]. В современных исследованиях в основном применяются времяпролетные [2,3], квадрупольные [4] и масс-спектрометры с ионными ловушками [5].

В нашей стране в период с середины 1960-х до начала 1990-х гг. многочисленные эксперименты по исследованию верхней атмосферы Земли были проведены с помощью метеорологических ракет МР12 (высота до 180 km) и МР30 (высота до 300 km), на которые устанавливались радиочастотные масс-спектрометры МХ6407.

В настоящее время на российских метеорологических спутниках типа „Метеор-М“ установлены радиочастотные масс-спектрометры РИМС-М [6,7], которые позволяют регистрировать газы в ионосфере. Наблюдения ведутся с 1989 г. на высотах (825–830) km.

Радиочастотный масс-спектрометр РИМС-М реализован на базе сложной прецизионной системы из 19 селектирующих электродов и требует высокочастотного напряжения питания (1–15 MHz). РИМС-М является сложным и дорогостоящим в производстве устройством, имеет массу 2.7 kg, потребляет до 20 W и дает плохо воспроизводимые спектры из-за сильной дискриминации масс. Эти характеристики ограничивают возможности его применения для малых спутников.

Для создания простого и миниатюрного масс-спектрометра в Институте аналитического приборостроения РАН предложен принципиально новый способ прямого масс-спектрометрического анализа состава ионизованных компонент верхних слоев атмосферы. Приборная реализация предложенного способа является сверхминиатюрной (состоит из 3 сеток) и питается от маломощного источника постоянного напряжения (потребляемая мощность 1 W).

Принцип действия

Как известно, искусственный спутник Земли движется с первой космической скоростью около 8 km/s. При такой скорости энергия залетающих в анализатор ионизованных и нейтральных компонент газов соответствующего слоя атмосферы различается в зависимости от массы иона. Диапазон энергий ионов основных газов при такой скорости полета лежит в диапазоне от 0.7 eV для водорода до 15.4 eV для CO_2 (см. таблицу).

Принцип работы предложенного масс-спектрометра основан на том, что при подаче соответствующего задерживающего напряжения на сетку анализатора можно последовательно отсекать ионы разных энергий и тем самым производить разделение соответствующих масс.

Энергия ионов разной массы

Ион	H_2	He	Ne	N_2	O_2	Ar	CO_2
Энергия, eV	0.7	1.4	7.0	9.8	11.2	14.0	15.4

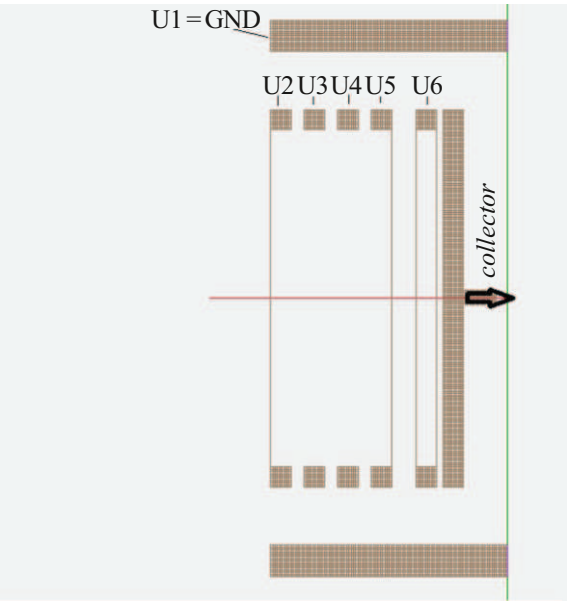


Рис. 1. Конфигурация электродов масс-анализатора.

Реализуя линейное изменение задерживающего напряжения в диапазоне от 0 до 16 V, можно получать развернутый масс-спектр ионов от водорода до углекислого газа в ионосфере.

На рис. 1 представлена конфигурация сеток и электродов предлагаемого масс-анализатора, где U2 — входная сетка (–60 V), U3-U5 группа тормозящих электродов, U6 — антидинатронная сетка (–70 V).

Для демонстрации возможностей предложенного принципа работы анализатора был произведен модельный расчет в программе SIMION.

Рассмотрим параллельный пучок типичного для верхних слоев атмосферы набора ионов H_2, He, Ne, N_2, Ar, CO_2 (по 10 000 ионов каждой категории), который направляется в масс-анализатор. При этом каждый ион из набора имел энергию в соответствии с таблицей. На сетку задержки U5 последовательно подаются возрастающие дискретные значения напряжения задержки в диапазоне 0–16 V с дискретностью 0.01 V.

В результате на выходе была получена следующая кривая задержки ионного тока, где каждая ступенька соответствует отсеву соответствующих ионов (рис. 2).

С увеличением массы фронт ступенек становится более пологим, что уменьшает разрешающую способность анализатора, но при этом не критично для идентификации и расчета интенсивности тока. При этом подбором постоянных потенциалов U3 и U4 можно добиться более крутых фронтов, и тем самым существенно увеличить разрешающую способность масс-спектрометра.

Дифференцируя полученную кривую задержки, можно получить полный масс-спектр модельной смеси газов (рис. 3). При этом разрешающая способность анализатора лежит в диапазоне от 0.2 Da для водорода до 0.5 Da для CO_2, в зависимости от массы ионов.

Далее в качестве образца поочередно представлены расчетные траектории ионов водорода и аргона в зависимости от достигнутой амплитуды напряжения задержки.

Селекция ионов водорода

На рис. 4, *a, b* представлены траектории ионов водорода до и после достижения полного задерживающего потенциала 0.7 V.

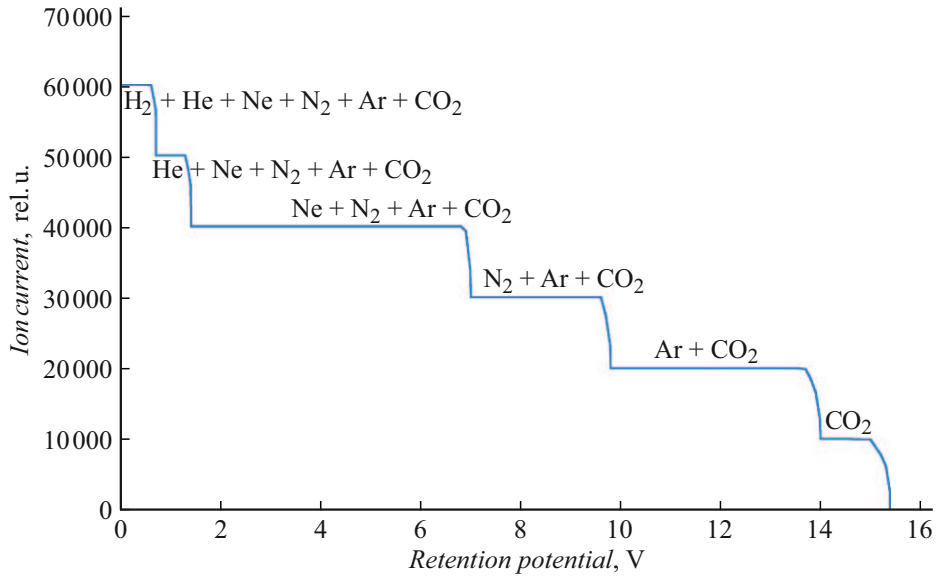


Рис. 2. Кривая задержки ионного тока.

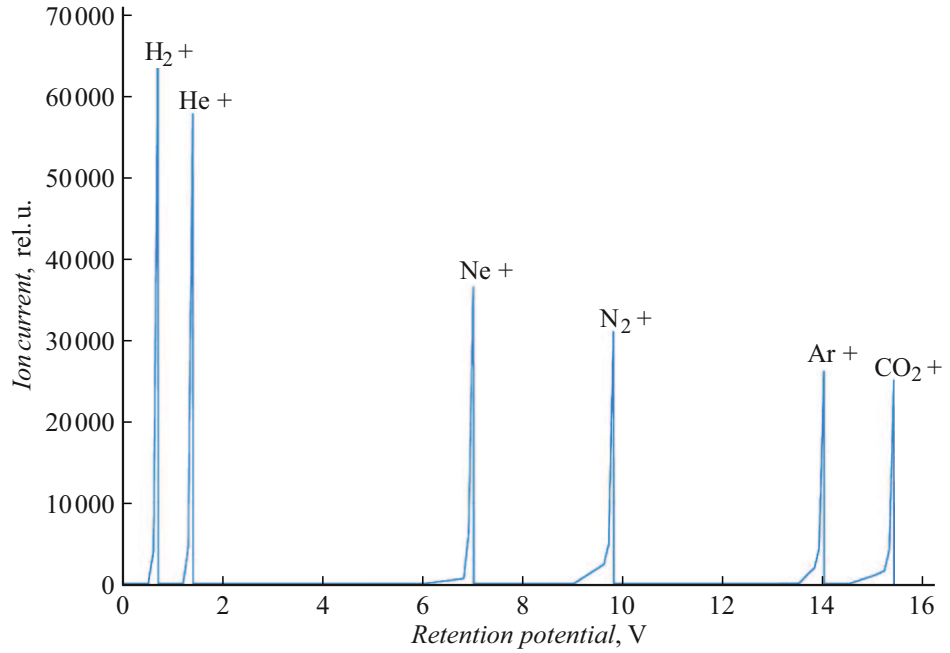


Рис. 3. Масс-спектр модельной смеси газов.

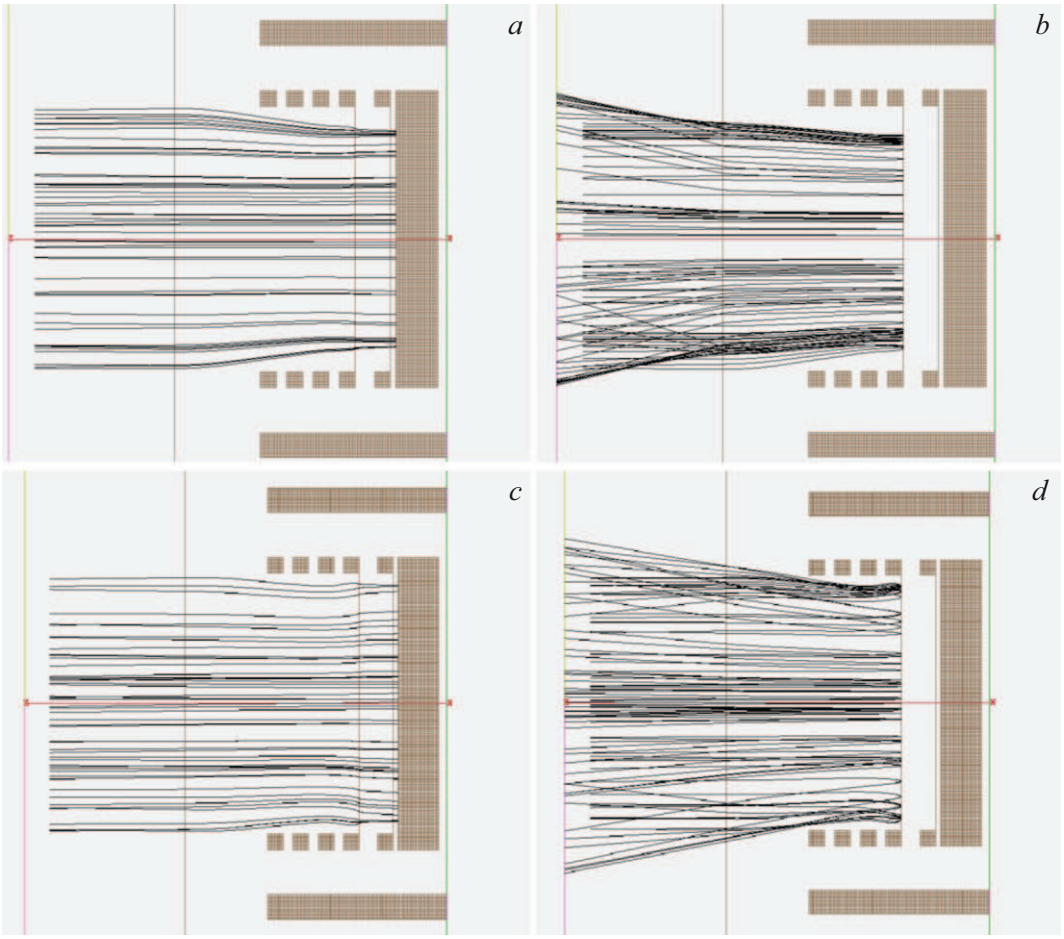


Рис. 4. Траектории ионов: *a* — водорода при задержке 0.6 V; *b* — водорода при задержке 0.7 V; *c* — аргона при задержке 13.7 V; *d* — аргона при задержке 14 V.

Когда на сетку U5 подается задержка +0.7 V, то все ионы водорода задерживаются и не попадают на коллектор (рис. 4, *b*). Остальные ионы He, Ne, N_2, Ar, CO_2 не задерживаются и пролетают до коллектора.

Селекция ионов аргона

Когда на сетку U5 подается задержка +13.7 V, все ионы аргона и CO_2 доходят до коллектора. На рис. 4, *c* показаны траектории ионов аргона.

Когда на сетку U5 подается задержка +14 V, все ионы аргона задерживаются и летят обратно (рис. 4, *d*), остальные ионы CO_2 не задерживаются и пролетают до коллектора.

Для задержки ионов CO_2 (44 Da) надо подать напряжение задержки 15.4 V.

В случае необходимости можно увеличивать потенциал задержки и тогда диапазон масс анализатора может быть расширен. При этом для более тяжелых ионов должны появиться новые ступеньки на кривой задержки. Однако стоит отметить, что масс-спектрометр планируется использовать на высотах 800−1000 km, основными газами на этих высотах являются гелий и водород, соответственно маловероятно, что молекулы тяжелых газов могут находиться там в заметных количествах, а также влиянием более тяжелых компонентов на определение концентраций легких компонентов можно пренебречь.

Заключение

Произведенные ионно-оптические расчеты показали, что предлагаемый принцип позволяет получать стабильное разделение ионов всех атмосферных газов с разрешающей способностью порядка 0.2−0.5 Da во всем диапазоне масс и практически не имеет потерь при транспортировке ионов до коллектора.

Конструктивное исполнение предложенной схемы масс-спектрометра просто в изготовлении, является сверхминиатюрным и вместе с блоком питания может иметь массу не более 300 g.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Ю.М. Качановскому и К.В. Грязнову за полезные обсуждения.

Финансирование работы

Работа выполнена по Гос. заданию Минобрнауки РФ № 075-00440-26-00.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] R. Arevalo Jr., Z. Ni, R.M. Danell. J. Mass Spectrom., **55** (1), e4454 (2019). DOI: 10.1002/jms.4454

[2] E.A. Everett, J.S. Dyer, M. Watson et al. American Geophys. Union, Fall Meeting, **12**, SA41B-1871 (2011).

[3] Zh. Ren, M. Guo, Y. Cheng, W. Sun, G. Li, M. Dong, Ya. Li, Zh. Xi, X. Pei, H. Niu, G. Tan, Zh. Zhou, Zh. Huang. J. Am. Soc. Mass Spectrom., **31** (2), 434 (2020). DOI: 10.1021/jasms.9b00092

[4] S.L. England, G. Liu, E. Yiğit, P.R. Mahaffy, M. Elrod, M. Benna, H. Nakagawa, N. Terada, B. Jakosky. J. Geophys. Res. Space Phys., **122** (2), 2310 (2017). DOI: 10.1002/2016JA023475

[5] J.P. Wright, S.J. Barber, G.H. Morgan, A.D. Morse, S. Sheridan, D.J. Andrews, J. Maynard, D. Yau, S.T. Evans, M.R. Leese, J.C. Zarnecki, B.J. Kent, N.R. Waltham, M.S. Whalley, S/ Heys, D.L. Drummond, R.L. Edeson, E.C. Sawyer, R.F. Turner, C.T. Pillinger. Space Sci. Rev., **128** (1), 363 (2007). DOI: 10.1007/s11214-006-9001-5

[6] Электронный ресурс. *Средства измерений, применяемые при гелиогеофизических наблюдениях*, ИБТС.468166.001 Режим доступа: https://e-ecolog.ru/docs/K0I-zsAISorhi3XnKOoAq)

[7] М. Иванов, В. Лапшин, А. Репин, Б. Кирюшов. Мир измерений, **3**, 26 (2021).