

УДК 550.388.2

DOI: 10.26907/rwp29.2025.195-200

ЗОНДИРОВАНИЕ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА ОРБИТЕ КА «МЕТЕОР»

А.В. Тертышников

ФГБУ «Институт прикладной геофизики», 128129, Москва, Россия, Ростокинская ул., 9

E-mail: atert@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено техническое решение для ионозонда на основе масс-спектрометрической селекции ионов в верхней атмосфере Земли. Представлены примеры зондирования концентраций основных ионов (O^+ , He^+ и H^+) верхней ионосферы Земли.

Ключевые слова: ионозонд; верхняя ионосфера; концентрации; ионы; зондирование; масс-спектрометр

SOUNDING OF THE UPPER IONOSPHERE IN ORBIT OF THE METEOR SPACECRAFT

A.V. Tertyshnikov

Annotation. The technical solution of an ionosonde based on mass spectrometric selection of ions in the upper atmosphere of the Earth is considered. Examples of sounding concentrations of basic ions (O^+ , He^+ , and H^+) in the Earth's upper ionosphere are presented.

Keywords: ionosonde, upper ionosphere, concentrations, ions, sounding

Введение

В России с 2009 г. ионный состав верхней ионосферы зондировался с КА серии «Метеор» на основе принципов радиочастотной масс-спектрометрии [1]. За 15 лет функционирования на солнечно-синхронной орбите были накоплены огромные массивы измерений [2]. В последних вариантах космических ионозондов ФГБУ ИПГ для КА серии «Метеор» за счет современной микроэлектроники удалось существенно повысить качество измерений ионного состава верхней атмосферы.

Первым ионозондом для КА серии «Метеор» был Радиочастотный измеритель масс-спектра (РИМС-1). В 2014 г. его заменил РИМС-2 [1]. На смену ему с 2023 г. был запущен масс-спектрометр космический (МСК). Ионозонды КК «Ионозонд» также прошли этап внешнего проектирования в ФГБУ ИПГ, где была восстановлена передовая научная школа космической масс-спектрометрии и проектирования ионозондов, в том числе вертикального зондирования для Ионосферно-магнитной службы Росгидромета.

За рубежом принципы радиочастотной масс-спектрометрии для измерения ионного состава верхней атмосферы реализованы в масс-спектрометрах для КА AE-B, Ogo 6, San Marco 3, Eros A и AE-C и др., а с 2005 г. для КА DMSP-6 [3]. Для верификации масс-спектрометрических измерений использовались данные ракетных экспериментов и радары некогерентного рассеяния (Аресибо, Хикамарка, Миллстоун и др.).

Многолетнее зондирование ионной компоненты верхней атмосферы на КА серии «Метеор» соответствует тенденции использования зарубежных масс-спектрометров: прибор «IAP» на КА DEMETER и его аналог – прибор «RAP» на China Seismo-Electromagnetic Satellite. Зарубежные масс-спектрометры, фактически, используются в качестве ионозондов, так как калибровка по нейтральной компоненте не валидирована. Получаемые данные зондирования полезны для верификации моделей ионосферы и данных зондирования ионосферы.

Состав зондируемых ионов

Для зондирования плотности электронной концентрации в ионосферной плазме в качестве первичного преобразователя часто используется зонд Лэнгмюра [4, 5], который позволяет оценить проводимость плазмы, связанную с количеством свободных электронов, но при некоторых нефизичных предположениях, например отсутствии магнитного поля в ионосферной плазме и др. При этом, считается, что концентрация электронов в ионосфере примерно соответствует концентрации положительно заряженных ионов, что обеспечивается высокой электрической квазинейтральностью ионосферной плазмы. Отрицательных ионов в слое выше 250 км мало.

Среди положительно заряженных ионов в диапазоне высот 200–700 км основным является ион O^+ (16 атомных единиц массы, а.е.м.) [6]. Выше 700 км проявляются эффекты гравитационного разделения газовых компонент, увеличивается доля ионов с атомной массой 1, 2 и 4. Выше 850–1250 км увеличивается угроза столкновения с космическим мусором [7], что учитывается при выборе орбит КА и возможности зондирования ионного состава верхней ионосферы и плазмосферы Земли.

Учитывая особенности распределения ионов по высоте и квазинейтральность ионосферы, диагностика концентрации основных (одного-трех) ионов (O^+ , H^+ , He^+), преобладающих среди других ионов по наибольшей доле в конкретном диапазоне высот, – это альтернатива для оценки электронной плотности в ионосфере.

Схема ионозонда

В конструкции ионозонда (рис. 1) используются первичные преобразователи, настраиваемые на измерение одного из трех типов ионов.



Рис. 1. Схема составляющих ионозонда: 1, 1*...1** – первичные преобразователи, 2 – блок питания, 3 – блок управления, 4 – блок обработки данных, 1.1 – ловушка, 1.2 – селектор, 1.3 – мишень

Количество первичных преобразователей зависит от диапазона высот зондирования. На высотах 200–600 км или выше 1500 км достаточно одного первичного преобразователя – анализатора концентрации иона. Кроме первичных преобразователей (1, 1*...1**) на рис. 1 показан блок питания, блок управления, блок анализа.

Основными элементами анализатора (блока 1) являются: ловушка ионов, селектор, мишень. Ловушка (1.1 на рис. 2) обеспечивает формирование потока ионов на селектор. Поток ионов (6 на рис. 2) за счет движения носителя ионозонда по орбите проходит через входное отверстие и вытягивается отрицательным потенциалом вытягивающей сетки во входном отверстии в селектор (1.2), состоящий из каскада сеток. Из селектора поток диагностируемого иона попадает на мишень (1.3). По величине катодного тока с мишени оценивается концентрация диагностируемого иона.

Электрический потенциал на сетке входного отверстия 5, относительно корпуса анализатора, обеспечивает затягивающее, либо экранирующее поле для заряженных частиц атмосферы в области зондирования, что необходимо для калибровки или при заданном режиме зондирования – анализа проб ионосферной плазмы.

В селектирующем каскаде сеток 7–11 на рис. 2 поток ионов 6–6* проходит через заряженные сетки (7–8 и 10–11), цилиндры задержки 9–9*, на которые подаются сигналы от генератора высокой частоты для селекции выбранного иона, сетку задержки 12, антиэлектронную сетку 13, через экран 14 на мишень–коллектор 15. При этом, положительные ионы ускоряются разностью потенциалов U между сетками 7 и 8 по направлению к сетке-цилиндру 9. Сетки 7, 8, 10, 11 расположены на одинаковом расстоянии S друг от друга.

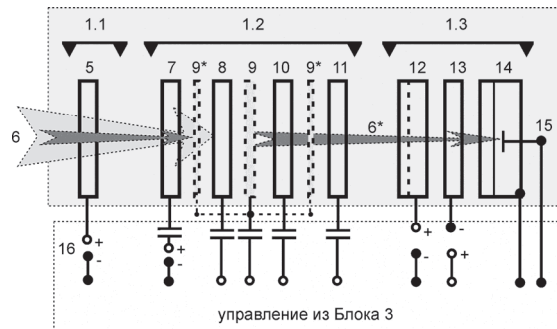


Рис. 2. Схема первичного преобразователя: 5 – сетка ловушки входного отверстия, 6-6* – направление потока ионов, 7 – первая сетка селективирующего каскада, 8 – вторая сетка, 9 и 9* – цилиндры для сигналов от генератора высокой частоты, 10 – третья сетка, 11 – четвертая сетка селективирующего каскада, 12 – сетка задержки, 13 – антиэлектронная сетка, 14 – экран, 15 – мишень с коллектором–катодом, 16 – ключ

Выбор S , U и частоты f подачи напряжения на сетки определяет настройку каскада селективирующих сеток анализатора на диагностику иона с массовым атомным числом M . Управляющая высокая частота f подается на сетку 9 от генератора, а управляющее напряжение U через ключи, которые связывают каскад сеток 7-8 с каскадом 10-11. Подбор S для каждого иона позволяет использовать фиксированные частоты от генераторов частот и нескольких напряжений U . Это технологически выгодно. Снижение уровня U актуально для функционирования ионозонда и бортовой аппаратуры носителя ионозонда, а для СВЧ-диапазона определяет возможность миниатюризации анализатора, настраиваемого на выбранную атомную массу зондируемого иона. При этом, высокая отрицательная чувствительность $\partial M/\partial S$ обуславливает точную настройку межсеточных расстояний для диагностики каждого типа иона, как и для вариаций частоты ($\partial M/\partial f$). Размещение дополнительных сеток с другим межсеточным расстоянием в одном преобразователе увеличивает технологическую сложность изготовления и настройки ионозонда. Для ионозонда, как расходного материала, целесообразна простая и дешевая схема.

Перед каскадом сеток 7-8 могут использоваться дополнительные антифоновые и антиэлектродные сетки, а между сетками 7-8 и 10-11 дополнительные сетки-цилиндры высокой частоты (9*), связанные с сеткой 9. Увеличение селективирующих каскадов используется для подавления ложных «гармонических» пиков в селекторе. Поток селективированного иона обозначен стрелкой 6*. Включение процессора в блок 3 позволяет задавать любые режимы (циклограммы) измерений, в том числе с выключенной ловушкой. В блоке управления возможно использование многозарядной аналого-цифровой платы.

Корпус зонда для измерений в ионосферной плазме негерметичный. Выходное отверстие зонда – это мишень-коллектор ионного тока 15, которого достигают диагностируемые ионы. Коллектор связан с устройством регистрации токов, соответствующих потоку достигших коллектора ионов. Датчики тока, связанные с АЦП, подключаются на выход 15, чтобы преобразовать значение ионного тока с коллектора в цифровой двоичный код.

Разрешающая способность регистрации количества селективированных ионов зависит от чувствительности датчиков ионного тока с коллектора. Современные микроэлектронные датчики позволяют фиксировать сверхмалые токи, но здесь нужны разумные ограничения, так как вариации электронной концентраций в невозмущенной ионосфере достигают десятков процентов [8, 9].

Команды на управление элементами ионозонда программируются в микропроцессоре. Калибровка коллекторных токов в мишени зонда в наземных условиях осуществляется барокамере низкого давления с калибровочной смесью ионов.

Блок обработки данных выполнен на основе микроконтроллеров, запоминающих устройств, с взаимодействием с системами управления и передачи информации носителя ионозонда, в качестве которых может быть канал связи с КА, так и прямо-передатчик с антенной, скоммутированные с ионозондом.

Масса действующего макета ионозонда составила несколько килограммов, что позволяет использовать его на малых КА и для ракетных экспериментов в диапазоне высот 200-900 км для измерений концентрации ионов O^+ , He^+ и H^+ . Комплекс тематических программ в процессоре может корректироваться. Частота и широтный диапазон зондирования задается по командам из блока управления. Настройка на диагностируемую величину M оценивается погрешностью не хуже 10%. Для расчетов характеристик целесообразно использовать математическую модель ионозонда. Стоимость действующего макета ионозонда, созданного на лампах прошлого века, оказалась на порядок дешевле серийных образцов космических масс-спектрометров.

Примеры результатов зондирования

На рис. 3 представлены результаты зондирования ионов O^+ , H^+ , N^+ , He^+ действующим макетом ионозонда – радиочастотным измерителем масс-спектра ионов (прибор РИМС-2) на орбите нисходящего (с северного полюса до южного полюса) утреннего полувитка КА «Метеор-2-2» 21.03.2021 г.

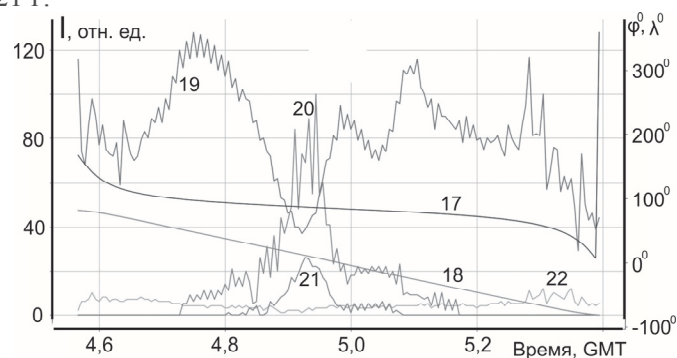


Рис. 3. Результаты зондирования катодного тока ионов макетом ионозонда на утреннем полувитке КА «Метеор-2-2» 21.03.2021 г.: 17 – широта, 18 – долгота, 19 – O^+ , 20 – He^+ , 21 – H^+ , 22 – N^+

По оси абсцисс зафиксировано текущее время, а по ординатам уровень катодных токов и соответствующие географические широта и долгота подспутниковой точки (правая шкала ординат). В зонах аврорального овала есть небольшие всплески концентрации O^+ , которые зависят от вида (до 5 видов) полярных сияний. Пересечение магнитного экватора характеризуется локальным минимумом в концентрации O^+ и повышенным содержанием ионов H^+ и He^+ . Для каждого иона свой калибровочный коэффициент перевода катодного тока в концентрацию.

Пригодность данных измерений для зондирования электронной плотности ионосферной плазмы оценивалась сравнением с данными производственной модели ионосферы Росгидромета «SIMP-2», доступной для снятия измерений на сайте ФГБУ «ИПГ» [10]. При сопоставлении данных рис. 3 с результатами моделирования электронной концентрации n_e по модели SIMP-2 (широта, долгота, высота, время те же) концентрация иона O^+ на витке была достаточно стабильной. Для концентрации иона N^+ коэффициент корреляции -0,48. Но концентрация иона N^+ мала, составляя до нескольких процентов от концентрации иона O^+ , хотя увеличение иона N^+ совпало с пересечением зоны Южного аврорального овала. Наибольшие коэффициенты корреляции с результатами моделирования электронной концентрации n_e по модели SIMP-2 продемонстрировали концентрации легких ионов: с атомными единицами массы 1 (H^+ , 0,52), 2 (H_2^+ , 0,59, но этого иона мало) и 4 (He^+ , 0,64), особенно в тропических и экваториальных широтах.

По данным измерений был рассчитаны регрессионные модели для нескольких диапазонов широт: от 81,50 с.ш. до 54° градусов с.ш., тропики-экватор ($\pm 22^\circ$ широты), над экватором $\pm 5^\circ$ широты. В высоких и средних широтах на высотах 200-700 км для оценки электронной плотности могут быть использованы только измерения катодных токов по содержанию иона O^+ , над тропиками и экваториальной зонами выше 600 км могут быть использованы только измерения катодных токов по содержанию легких ионов с атомной массой 1 и 4, над экваториальными широтами измерения содержания иона H^+ . Выше 1300 км достаточно

измерений содержания иона H^+ . Суммарная концентрация указанных ионов фактически определяет концентрацию электронов.

Значительные стандартные ошибки в уравнениях регрессии не представляются критичными, так ионосфера и верхняя ионосфера характеризуется высокой изменчивостью, что подтверждают оценки невозмущенной ионосферы в $\pm 50\%$ по концентрации электронов в [8, 9], а также результаты сравнения расчетных моделей электронной концентрации ионосферы SIMP-2 с усовершенствованной $SIMP_{ус}$, доступной по адресу [11], а также SIMP-2 с IRI в [6, 12, 13]. Для модели $SIMP_{ус}$ калибровочный коэффициент при катодных токах для иона O^+ в северном полушарии увеличивается почти на 50% до 126, а для легких ионов в 5 раз. Различие между SIMP-2 с IRI в экваториальной зоне достигает 300 % и более. Что подчеркивает необходимость регулярной калибровки измерений и корректировки моделей электронной плотности ионосферы. Сложная морфология модельного пояса электронов над экваториальными широтами и несоответствие в сотни процентов с результатами измерений суммарной концентрации ионов отмечена также в [14].

По архивным данным зондирования ионного состава верхней атмосферы из [2] удалось решить ряд задач по климатическим исследованиям ионосферы, разработать технологию диагностики границ одиннадцатилетнего цикла солнечной активности [15], что обеспечило национальную информационную независимость от Бельгийской королевской обсерватории и от Национальной солнечной обсерватории США. Разработаны статистические модели морфологии полярных шапок, аврорального овала и полярного ионосферного провала вблизи полюсов Земли [16], экваториальной токовой струи в ионосфере, откликов эффекта переполусовки солнечного магнитного диполя перед максимумом «11-летнего» цикла солнечной активности и др.

Возможна настройка ионозонда для диагностики отрицательно заряженных ионов и сверхтяжелых техногенных ионов.

Заключение

Функционирующие с 2009 г. на солнечно-синхронных орбитах ионозонды ФГБУ ИПГ, созданные на принципе радиочастотной масс-спектрометрии, позволяют решать актуальные задачи мониторинга верхней ионосферы.

Усовершенствованный ионозонд позволяет проводить автоматические контактные измерения ионного состава ионосферы на принципе радиочастотной масс-спектрометрии в разных гелиогеофизических условиях, времени суток и решать задачи прикладной геофизики.

Список литературы

1. Тертышников А.В. Масс-спектрометр космический. Патент № 2726186 по заявке № 2019121111/20(041262) в реестре ФИПС от 05.07.2019.
2. Пополняемая база спутниковых данных ионного состава верхней атмосферы на высотах 808–835 км от поверхности Земли на 2010–2014 года (часть 1, 2). / Саморуков В.В., Кирюшов Б.М., Репин А.Ю. и др. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620207 (часть 1), № 2022621368 (часть 2). ФГБУ ИПГ.
3. Berthelier J.J., Godefroy M., Leblanc F., Seran E., Peschard D., Gilbert P., Artru J. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER // Planetary and Space Science. – 2006. – Vol. 54, Issue 5. – P. 487–501. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.10.018>.
4. Лебедев Ю.А. Электрические зонды в плазме пониженного давления. – URL: <https://plazma.karelia.ru/pub/fntp/Lebedev.pdf>.
5. Зонд Лэнгмюра. Режим доступа: <http://www.optimum-lab.ru/product/zond-lengmjura-zl-t-tajfun/>.
6. Bilitza, D., Pezzopane, M., Truhlik, V., Altadill, D., Reinisch, B. W., & Pignalberi, A. (2022). The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark. Reviews of Geophysics, 60, e2022RG000792. – URL: <https://doi.org/10.1029/2022RG000792>.
7. Распределение космического мусора по высотам орбит. – URL: <https://infopedia.su/18x98ac.html>

8. Зевакина Р.А., Жулина Е.М., Носова Г.Н., Сергеенко Н.П. Руководство по краткосрочному прогнозированию ионосферы. – М., 1990. – 72 с.
9. Тertyshnikov A.V., Сыроешкин А.В. и др. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть 1. Ионосферные наблюдения. Выпуск 1 (Проект). – М., 2012. – URL: http://elibr.shu.ru/files_books/pdf/img-16688.pdf.
10. Расчет состояния ионосферы по модели SIMP. Профиль электронной концентрации по модели SIMP2. – URL: <http://space-weather.ru/#/simp>.
11. Профиль электронной концентрации по модели SIMP2ус. – URL: <http://space-weather.ru/simp2?model=corrected&output=Ne&grid=profile&latitude=-34&longitude=75&datetime=2021-03-21T04-34-00Z&heightMin=820&heightMax=900&heightStep=10>.
12. Билица Д., Международный справочник по ионосфере 2000, Radio Science, 36, 261–275, 2001.
13. Международная эталонная ионосфера (IRI). – URL: <https://www.spenvis.oma.be/help/background/atmosphere/models.html>
14. Biyan Chen, Hengrui Cao, Jinyong Wang, Jianping Huang, Zelang Miao, Comparison of electron density measurements from CSES and Swarm satellites with GNSS ionospheric tomography data // Advances in Space Research. – 2023. – Vol. 71. – Iss. 6. – P. 2818–2832. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.11.040>.
15. Тertyshnikov A.V. Способ определения начала цикла солнечной активности. Патент. Рег. № 2023135791 в реестре ФИПС от 27.06.2024. Заявл. 27.12.2023 г.
16. Тertyshnikov A.V. Способ зондирования границ аврорального овала и состояния магнитного поля Земли. Патент по заявке № 2023111370/28(024305) в реестре ФИПС от 02.05.2023 г.