ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИЧНОЙ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ МЭП-2 НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА *СПЕКТР-Р*

© 2013 г. Я. Балаж¹, В. А. Гладышев², К. Кудела¹, А. А. Петрукович², Е. Саррис³, Т. Саррис³, М. Сливка¹ и Я. Стржарски¹

> ¹ Институт экспериментальной физики Словацкой академии наук, Кошице kkudela@kosice.upjs.sk
> ² Институт космических исследований РАН, г. Москва apetruko@iki.rssi.ru
> ³ Университет Фракии им. Демокрита, Ксанти, Греция

В статье кратко описан эксперимент по измерениям энергичных частиц МЭП-2 на борту высокоапогейного спутника *Спектр-P*. Прибор измеряет потоки электронов в диапазоне энергий 30– 350 кэВ и ионов в диапазоне 30 кэВ–3.2 МэВ, используя две пары кремниевых датчиков. Приведены примеры первых наблюдений ускоренных частиц у околоземной ударной волны. Обсуждены уникальные наблюдения колебаний потоков энергичных ионов с периодом около 30 сек.

DOI: 10.7868/S0023420613020015

1. ВВЕДЕНИЕ

Прибор МЭП-2 является частью плазменномагнитного эксперимента "Плазма-Ф" на борту космического аппарата Спектр-Р. Спектр-Р-радиоастрономический спутник, запущенный Российским космическим агентством 18.VII.2011 на орбиту с апогеем около 350 тыс. км, наклонением -51.6°, и периодом – около 8.5 дней. "Плазма-Ф" состоит из четырех приборов, предназначенных для наблюдений солнечного ветра и внешней магнитосферы [1]. Кроме МЭП-2, "Плазма-Ф" включает магнитометр ММФФ, монитор потока солнечного ветра БМСВ и систему сбора и обработки данных ССНИ-2. ССНИ-2 собирает данные измерений со всех приборов "Плазма-Ф", сохраняет их в своей памяти и передает в радиосистему КА в сеансах связи. ССНИ-2 имеет около 100 ГБ памяти, что позволяет осуществлять бортовую обработку данных с возможностью их выбора и сжатия. Главная научная задача эксперимента "Плазма-Ф" состоит в изучении быстрых вариаций в солнечном ветре, переходной области и внешней магнитосфере с помощью синхронизированных измерений магнитного поля, потока ионов солнечного ветра и энергичных частиц с временным разрешением до 32 отсчетов в секунду. Вторая цель эксперимента – мониторинг и прогноз космической погоды. Ожидаемый объем данных в случае постоянных измерений с частотой 32 Гц составляет приблизительно 1 ГБ в неделю.

Спектрометр энергичной плазмы МЭП-2 [2] разработан и изготовлен в Институте экспериментальной физики Словацкой академии наук (Словакия) в сотрудничестве с Институтом космических исследований РАН (Россия) и университетом Демокрита (Греция). Он проводит измерения энергетических спектров потоков электронов (30–350 кэВ) и протонов (30 кэВ–3.2 МэВ), используя две пары кремниевых детекторов.

Наш предыдущий прибор – спектрометр ДОК-2 на борту пары КА ИНТЕРБОЛ (1995-2000) позволил исследовать ускорение энергичных частиц и их динамику в магнитосфере Земли с уникально высоким энергетическим разрешением, обеспечиваемым пассивным охлаждением датчиков, и с разрешением по времени до одной секунды. В частности были идентифицированы всплески почти моноэнергичных ионов около головной ударной волны, которые были проинтерпретированы как признак местного ускорения ионов во время столкновений межпланетных токовых слоев с ударной волной [3–5]. В другом важном исследовании была изучена динамика инжекций плазмы, дрейфующих с ночной стороны магнитосферы на дневную и определены место и время их начала [6-8].

Прибор МЭП-2 на спутнике *Спектр-P*, прежде всего, предназначен для продолжения исследований свойств и происхождения надтепловой плазмы в околоземной межпланетной среде и на более высокой орбите, чем орбиты проекта *ИНТЕРБОЛ*, и, в частности, изменчивости ионных и электронных потоков с высоким уровнем чувствительности. Вторая задача — участие в многоточечных наблюдениях временной и пространственной структуры потоков вне головной ударной волны Земли. Гибкая система съема измерений обеспечивает разрешение по времени начиная с 32 мс (в из-



Рис. 1. Общий вид МЭП-2.

бранном интервале энергий) до 1.024 с (для энергетических спектров с 32 каналами). Далее представлено устройство прибора и проиллюстрированы его возможности на примере данных первого месяца работы.

2. УСТРОЙСТВО ПРИБОРА И ФОРМАТ Данных

Механическая конструкция прибора (рис. 1) состоит из прямоугольного блока электроники с разъемами и четырьмя детекторами, установленными сверху на специальных угловых кронштейнах, задающих определенные направления изме-

рений. На борту прибор закрывается многослойной тепловой изоляцией, за исключением входных апертур детекторов. Кремниевые детекторы установлены в коллиматорах с соответствующей ориентацией. Датчики установлены двумя взаимно перпендикулярными парами. Датчики ионов оборудованы магнитным фильтром, защищающим от электронов, а электронные датчики защищены от потоков ионов металлизированной полимерной пленкой.

Функционально прибор состоит из блока обработки сигналов, блока цифровой обработки, блока телеметрических интерфейсов и блока питания (рис. 2). Канал обработки аналогового сигнала каждого детектора содержит дискриминатор. Нижний и верхний пороги дискриминатора управляются процессором прибора в соответствии с режимом измерений в ходе базового цикла, равного одной секунде (1.024 с).

В приборе предусмотрены 255 возможных режимов работы. Режимы полностью определяются таблицей уровней дискриминатора и активируются по команде. 128 режимов заложены в память во время разработки прибора, а остальные могут быть загружены во время полета. Таблица уровней содержит 32 строки, отдельно для двух ионных и двух электронных датчиков. Структура снимаемого энергетического спектра определяется величинами порогов. Если заданы одни и те же величины порогов во всех 32 строках, то один диапазон энергий опрашивается 32 раза в секунду. Так же можно задать спектр с двумя энергетическими диапазонами, опрашиваемый 16 раз в секунду, с четырьмя диапазонами – 8 раз в секунду, с восемью диапазонами – четыре раза в секунду, с 16 диапазонами – дважды в секунду, с 32 диапазонами – один раз в секунду, или любой другой более сложный цикл просмотра по энергии.

Основные параметры прибора МЭП-2 приведены в таблице.



Рис. 2. Функциональная блок-схема МЭП-2 (DET – детектор, CSA – зарядо- чувствительный усилитель, PA – усилитель импульсов, H, L – дискриминаторы, WL – логическое окно, EC – счетчик импульсов, DAC – цифро-аналоговый преобразователь, DLT – таблица уровней дискриминатора, µP – микропроцессор, I/F – интерфейсы).

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 51 № 2 2013

Данные МЭП-2 форматируются в телеметрические блоки длиной 147 байт, содержащие заголовок, 14 служебных параметров (номер режима, пороги детекторов, температуры, напряжения), 32 измерения потоков частиц (в сжатом виде) от каждого из четырех датчиков (Р1, Р2, Е1 и Е2) с временным шагом 32 мс, четыре канала интегральной скорости счета (по одному для каждого детектора) и байт контрольной суммы. Один блок содержит информацию, получаемую примерно за одну секунду (1.024 с) измерений. Данные МЭП-2 передаются в ССНИ-2, в котором к каждому блоку добавляется метка времени. Эти блоки заносятся в память ССНИ-2 и передаются на Землю. ССНИ-2 также может проводить сжатие данных МЭП-2, суммируя измеренные потоки по предписанному числу блоков МЭП-2. Сжатые данные в формате, идентичном формату оригинальных данных, также постоянно заносятся в память ССНИ-2.

На первом шаге наземной обработки данные МЭП-2 расшифровываются в десятичный формат и привязываются к всемирному времени. Полученные данные далее используются для физической обработки [9].

3. РАБОТА МЭП-2 В ПОЛЕТЕ

МЭП-2 был включен 30.VII.2011 года в солнечном ветре, и с тех пор работает почти постоянно за исключением близких к перигею орбиты интервалов в пределах приблизительно 60000-80000 км от Земли, где прибор выключается, чтобы избежать насыщения детекторов в высоких потоках частиц внутренней магнитосферы. Первая стадия обработки данных заключается в оценке качества работы прибора. Рисунок 3 (слева) представляет калибровку прибора с помощью генератора импульсов (приблизительно 10000 раз в секунду) в первый день работы. Результаты калибровки удовлетворительны для датчиков Е1, Е2 и Р1. В сигнале Е2 присутствует двухминутная периодичность в самом низком энергетическом канале, однако, она не влияет на качество измерений и, вероятно, связана с влиянием других систем космического аппарата. Ее происхождение является объектом дальнейшего исследования. Датчик Р2 находился в насыщении из-за попадания на него отраженного света Солнца. Ориентация космического аппарата была позднее изменена, и датчик Р2 стал работоспособным.

Уровень шумов прибора был определен 13.VIII.2011 (рис. 3, справа) так же с помощью бортового генератора импульсов. Ширина пика на полувысоте (FWHM) в электронных каналах составляет примерно 25 кэВ, а в ионных каналах несколько больше — 40 кэВ, вероятно из-за более высокой чувствительности к солнечному свету.

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 51 № 2 2013

Параметры МЭП-2

Bec	2.64 кг
Размеры	211 × 175 × 182 мм
Расход энергии	1.1 Вт
Поле зрения	50°, коническое
Геометрический фактор	0.77 см ² ср
Активная площадь детекторов	300 мм ²
Толщина детекторов	100 мкм (ионы), 500 мкм (электроны)
Энергетический диапазон, ионы	30 кэВ–3.2 МэВ
Энергетический диапазон, электроны	30 кэВ—350 кэВ
Число энергетических каналов	1-32
Разрешение по времени	32—1024 мс
Информативность	1125 бит/с

4. ПРИМЕР 1. СПЕКТРЫ ИОНОВ ВНЕ ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Спектрограммы потоков протонов в зависимости от энергии, наблюдавшиеся детекторами P1 и P2 во время короткого периода 22.VIII.2011 года, показаны на рис. 4. МЭП-2 работал в режиме, позволяющем наблюдать поток электронов и ионов в 32 энергетических каналах. Спутник находился в положении далеко впереди головной ударной волны и два возрастания потока приблизительно в 09.45 и 09.53 всемирного времени соответствуют, наиболее вероятно, моментам, в которые спутник был связан силовой линии магнитного поля с ударной волной. Всплесков потоков энергичных электронов в этот период зарегистрировано не было.

5. ПРИМЕР 2. КОЛЕБАНИЯ ПОТОКА ИОНОВ В ФОРШОКЕ

Вскоре после своего первого включения МЭП-2 зафиксировал спорадическое возрастание потока ионов 31.VII.2011 г. около 10 часов всемирного времени (рис. 5). Режим прибора соответствовал измерениям спектров с 4 энергетическими уровнями 8 раз в секунду. Интересная особенность этого возрастания - присутствие сильных колебаний потока с периодами порядка 30 секунд в начале всплеска и с приблизительно вдвое меньшим периодом около 15 секунд в его заключительной части. Периодограмма (не показана) содержит соответствующие максимумы с высокой статистической значимостью (0.999). С учетом постоянной ориентации спутника в пространстве эта периодичность, скорее всего, не связана с питч-угловым распределением. Подобная периодичность потоков энергичных ионов ранее не наблюдалась, прежде всего, из-за достаточно грубого разрешения по времени прошлых



Рис. 3. а – результат первого тестирования МЭП-2 в полете. Нижняя панель показывает переключение режима калибровки с детектора на детектор; б – уровень шумов МЭП-2.



Рис. 4. Спектрограмма потоков ионов. На графике проведено суммирование по парам энергетических каналов.

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 51 № 2 2013



Рис. 5. Вариации потока ионов, зарегистрированные детектором Р1.

измерений. Дальнейшее объяснение этой периодичности, прежде всего, потребует исследования ее связи с колебаниями магнитного поля, а так же анализа большего числа наблюдений.

Чтобы должным образом интерпретировать измерения в солнечном ветре вблизи Земли. необходимо определить, имеется ли магнитное сопряжение между точкой наблюдений и околоземной ударной волной и ее тип (квазиперпендикулярный или квазипараллельный) в сопряженной точке. К сожалению, для данного момента измерений магнитного поля на Спектр-Р не проводилось. Спутник находился в солнечном ветре, в точке с координатами (46.432, -9.615, 13.539) в единицах радиусов Земли в системе координат GSE. Оценка межпланетного магнитного поля (ММП) может быть получена, используя данные спутников ACE (в точке L1) и ARTEMIS (вблизи Луны, в данный момент на дневной стороне). В течение рассматриваемого промежутка времени ММП имело устойчивое радиальное направление (основной компонент ММП $B_x \sim 5$ нТл). Соответственно, гиропериод протона был равен приблизительно 10 секундам. В приближении силовой линии ММП как прямой (например, [10]) и используя аналитическую модель головной ударной волны, зависящую параметрически от скорости солнечного ветра и плотности [11], получаем, что точка наблюдений магнитно связана с квазипараллельным участком околоземной ударной волны в относительно высоких северных широтах.

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 51 № 2 2013

Детальные исследования заряженных частиц вблизи головной ударной волны Земли в энергетическом диапазоне выше энергии солнечного ветра и ниже чем у космических лучей проводились по наблюдениям проектов *Cluster*, *Geotail*, *THEMIS*, *Stereo*, *AMPTE/IRM*, *Прогноз-10*, *ИНТЕРБОЛ* и других. При этом обсуждалось происхождение и ускорение частиц с обеих сторон ударной волны (например, [12–15]). В частности, данные, полученные из измерений проектов *ИНТЕРБОЛ* и *Прогноз-10*, указывают на комбинацию процессов утечки частиц из магнитосферы и ускорения на головной ударной волне [10, 16]. Баланс вкладов обоих механизмов зависит от энергии.

Частота колебаний потоков ионов, наблюдавшаяся МЭП-2, находится в диапазоне пульсаций Рс3. Амплитуды Рс3 и Рс4 пульсаций имеют тенденцию к увеличению со скоростью солнечного ветра [17, 18]. Скорость солнечного ветра во время наших наблюдений была довольно высокой, 620-650 км/с. Циклотронное резонансное ускорение в каспе магнитосферы может нагревать ионы от килоэлектронвольт до мегаэлектронвольт за секунды [19]. Статьи [20,21] показывают, что мощности КНЧ колебаний в диапазоне 0.033-500 с в каспе коррелированы с интенсивностью ионов гелия с энергиями поряка мегаэлектронвольт. Пульсации диапазона Рс3 в каспе часто имеют пик в спектрах мощности около периода 30 с (рис. 2, 3 в [22]). Если ускорение ионов в каспе происходит в течение очень короткого промежутка времени, то пульсации в каспе могут быть "запечатлены" во временной структуре ускоренных ионов. Таким образом, один из вариантов происхождения наблюдаемых вариаций ускоренных ионов с периодом ~30 с — их переменное ускорение в каспе с последующей утечкой частиц в расположенную вверх по течению область.

Наблюдения магнитозвуковых волн с периодом около 30 с в форшоке околоземной ударной волны также довольно часты (например, в данных Cluster [23]). Подобный сценарий может быть вторым кандидатом на объяснение наблюдаемых вариаций потока ионов. Наконец, изменения в потоке ускоренных частиц могут отражать динамику кинетического процесса ускорения ионов солнечного ветра непосредственно на фронте головной ударной волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прибор МЭП-2 на спутнике *Спектр-Р* благодаря большому геометрическому фактору и высокому разрешению по времени позволил получить новые интересные данных по потокам энергичных ионов и электронов в межпланетном пространстве и внешней магнитосфере. Пример наблюдений в форшоке ударной волны колебаний энергичных ионов с периодом ~30 секунд вплоть до энергий в сотни кэВ может помочь изучить возможные механизмы их ускорения.

К. Кудела благодарит Я. Штетиарову за помощь в обработке данных. Эта работа была поддержана агентством VEGA: проекты 2/0081/10 и 2/0094/10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н., Петрукович А.А. и др. Эксперимент "Плазма-Ф" на спутнике Спектр-Р // Комич. исслед. 2013. Т. 51. № 2. (Соsmic Research. Р.
- Baláz J., Strhárský I. Programmable energetic particle spectrometer MEP-2. Preprint UEF SAV. UEF-01-07. 2007.
- 3. Lutsenko V.N. and Kudela K. Almost monoenergetic ions near the Earth's magnetosphere boundaries // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. № 3. P. 413–416. doi:10.1029/1999GL900002.
- 4. *Lutsenko V.N., Gavrilova E.A.* Properties and the origin of Almost Monoenergetic Ion (AMI) beams observed near the Earth's bow shock // Ann. Geophys. 2011. 29. P. 1439–1454.
- Kudela K., Lutsenko V.N., Sibeck D.G. et al. High energy particle dispersion events observed by Interball-1 and 2 // Adv. Space Res. 2002. V. 30. Issue 7. P. 1783– 1786. 2002.
- Lutsenko V.N. Almost Monoenergetic Ions: New Support for Alfven Ideas on the Role of Electric Currents in Space Plasmas // Phys. Chem. Earth (C). 2001. V. 26. P. 615–619.
- 7. Lutsenko V.N., Gretchko T.V., Kobelev A.V. et al. "Wavy" Energetic Ion Dispersion Events and PC-5

Type Magnetic Field Pulsations // Adv. Space Res. 2002. V. 30. 1783–1786.

- Lutsenko V.N., Gavrilova E.A., Grechko T.V. Statistics of fine dispersion structures events in energetic particle spectra: their origin and role in the outer magnetosphere // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 2097–2110.
- Slivka M., Kudela K. The primary processing of MEP-2 data for the satellite project Spektr-R (Radio-Astron) // Proceedings of 17th Conference of Slovak and Czech Physicists. Žilina / Ed. M. Reiffers. 2011.
- Kudela K., Slivka M., Sibeck D.G. et al. Medium energy proton fluxes outside the magnetopause: Interball-1 data // Adv. Space Res. 2000. V. 25. P. 1517–1522.
- Formisano V. Orientation and shape of the Earth's Bow Shock in three dimensions // Planet Space Sci. 1979. V. 27. P. 1151–61.
- Fuselier S.A. (1994). Superthermal ions upstream and downstream from Earth's bow shock, in Solar Wind Sources of Magnetospheric UltraLowFrequency Waves // Geophys. Monogr. Ser. AGU, Washington, D. C. Ed. by M.J. Engebretson, K. Takahashi, and M. Scholer. 2007. V. 81 P. 107–119.
- Berezhko E.G., Taneev S.N., Trattner K.J. Accelerated ions and self-excited Alfvén waves at the Earth's bow shock // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. A07102. doi:10.1029/2010JA016404.
- Kronberg E.A., Kis A., Klecker B. et al. Multi point observations of ions in the 30–160 keV energy range upstream of the Earth's bow shock // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. A03211. doi:10.1029/2008JA013754.
- Kronberg R.A., Bučík R., Haaland S. et al. On the origin of the energetic ion events measured upstream of the Earth's bow shock by STEREO, Cluster, and Geotail // J. Geophys. Res. V. 116. A02210. doi: 10.1029/2010JA015561.2011.
- Kudela K., Sibeck D.G., Slivka M. Prognoz 10 Energetic particle data: Leakage from the Magnetosphere Versus Bow Shock Acceleration // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № A12. P. 23461–23472.
- Chugunova O.M., Pilipenko V.A., Engebretson M.J. Statistical Features of Pc3-4 Pulsations at very high latitudes// Physics of Auroral Phenomena. Proc. XX–VI Annual Seminar. Apatity. 2003. P. 103–106.
- Engebretson M.J., Zanetti L.J., Potemra T.A. et al. Simultaneous observation of Pc3-4 pulsations in the solar wind and in the earth's magnetosphere // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. № A9. P. 10053–10062.
- Jiasheng Chen. Evidence for particle acceleration in the magnetospheric cusp // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 1993–1997.
- 20. Jiasheng Chen, Fritz Th.A., Sheldon R.B. et al. Cusp energetic particle events: Implications for a major acceleration region of the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № A1. P. 69–78.
- Jiasheng Chen and Fritz Th.A. Correlation of cusp MeV helium with turbulent ULF power spectra and its implications // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. № 22. P. 4113–4116.
- 22. Engebretson M.J., Anderson B.J., Cahill L.J. et al. Ionospheric Signatures of Cusp Latitude Pc3 pulsations // Geophysical Res. 1990. V. 95. № A3. P. 2447–2456.
- 23. *Eastwood J.P., Balogh A., Mazelle C. et al.* Oblique propagation of 30 s period fast magnetosonic foreshock waves: A Cluster case study // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L04804. doi:10.1029/2003GL018897.

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 51 № 2 2013