

**ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО
ПОЛЯ НА СВОЙСТВА УСКОРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДАЛЬНИХ
ОБЛАСТЯХ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

**INFLUENCE OF GLOBAL TYPOLOGY OF INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD
ON THE PROPERTIES OF ACCELERATING PROCESSES IN THE FAR REGIONS
OF THE EARTH MAGNETOSPHERE TAIL**

Е.Е. Григоренко¹, Л.М. Зеленый¹, А.О. Федоров², Ж.-А. Сово²

¹*Институт космических исследований РАН*

²*Centre d'Etude des Recherchers Rayonnements, Toulouse, France*

We present results of statistical study of high-speed ion beams (beamlets) observed by the Interball-1 satellite in the boundary region of the plasma sheet of the geomagnetic tail of the Earth's magnetosphere. Beamlets result from nonlinear acceleration processes occurring in the current sheet in the distant regions of the geomagnetic tail. They propagate toward the Earth along the magnetic field lines and are detected in the boundary region of the plasma sheet and near the high-latitude boundary of the plasma sheet in the auroral region in the form of short (with a duration typical observed by one spacecraft of ~1–2min) bursts of high-energy (with energies of about several tens of keV) ions. The size of the latitudinal zones where the beamlets are localized in the tail was determined using the epoch superposition method. The relationship between the frequency of beamlet generation in the boundary region of the plasma sheet and the prehistory of the direction of the interplanetary magnetic field (the magnitude of a clock angle) is investigated. It is established that this direction exerts a global effect on the beamlet generation frequency; moreover, it was found that the beamlet generation frequency in the midnight local time sector of the tail and at the flanks depends differently on the direction of the interplanetary magnetic field. In the midnight sector, the beamlets are observed at almost all directions of the interplanetary field, whereas the frequency of their generation at the flanks is maximal only when the interplanetary magnetic field has a large azimuthal component.

1. Введение

Геомагнитный хвост земной магнитосферы с момента его открытия в конце 60-х годов привлекает внимание исследователей как один из наиболее сложных и интересных объектов в космической физике. Он образуется на ночной стороне Земли в результате вытягивания силовых линий магнитного поля Земли потоком плазмы солнечного ветра (СВ), непрерывно движущимся от Солнца. В геомагнитном хвосте происходит накопление энергии, поступающей в магнитосферу из СВ. Эта энергия высвобождается либо взрывообразным образом, вызывая магнитные суббури, либо порциями посредством ускорения сравнительно небольшого количества частиц. В последнем случае хвост может в течение длительного времени находиться в квазистационарном режиме. Проявлениями таких ускорительных процессов, происходящих в дальних областях хвоста (на расстояниях ~100R_E от Земли, где R_E-радиус Земли), являются локализованные пучки высокоэнергичных (с энергией порядка нескольких десятков кэВ) ионов (бимлеты), движущиеся к Земле вдоль силовых линий магнитного поля в пограничном плазменном слое (ППС) [3, 7] (Рис.1).

Первоначально считалось, что бимлеты являются короткоживущими плазменными структурами, т.к. время их наблюдения на одном КА обычно не превышало 2мин. Однако многоточечные наблюдения, выполненные спутниками Cluster, позволили установить, что короткое время наблюдения бимлетов в большинстве случаев связано с движениями границы ППС, обусловленными «болтанием» хвоста, т.н. флэппингом, в то время как время существования бимлетов составляет обычно 5-10 минут, а в отдельных случаях достигает 20 мин [4].

Согласно теории, бимлеты генерируются в результате неадиабатического ускорения ионов в токовом слое (ТС) дальних областей хвоста (в областях с малой величиной нормальной компоненты магнитного поля B_Z) [6]. Причем, ускорение частиц в

области обращения знака магнитного поля носит резонансный характер [1, 2]. То есть, в зависимости от локальных условий в ТС частицы, поступающие в него из мантии или из ионосферы, могут либо испытать сильное рассеяние и быть захвачены в ТС, либо выйти из него практически без рассеяния и, двигаясь по Спайсеровским орбитам, сформировать пучки (бимлеты), быстро движущиеся к Земле в ППС [1] (Рис. 2).

Однако до сих пор неясно, является ли появление бимлетов в ППС следствием высвобождения избыточной энергии, поступившей извне, т.е. связано с какой-то определенной предысторией в межпланетной среде (в частности с каким-либо определенным направлением межпланетного магнитного поля (ММП)) или же это постоянное явление, происходящее в хвосте независимо от внешних условий. В данной работе мы попытаемся выяснить статистически влияние направления ММП на частоту появления бимлетов в ППС.

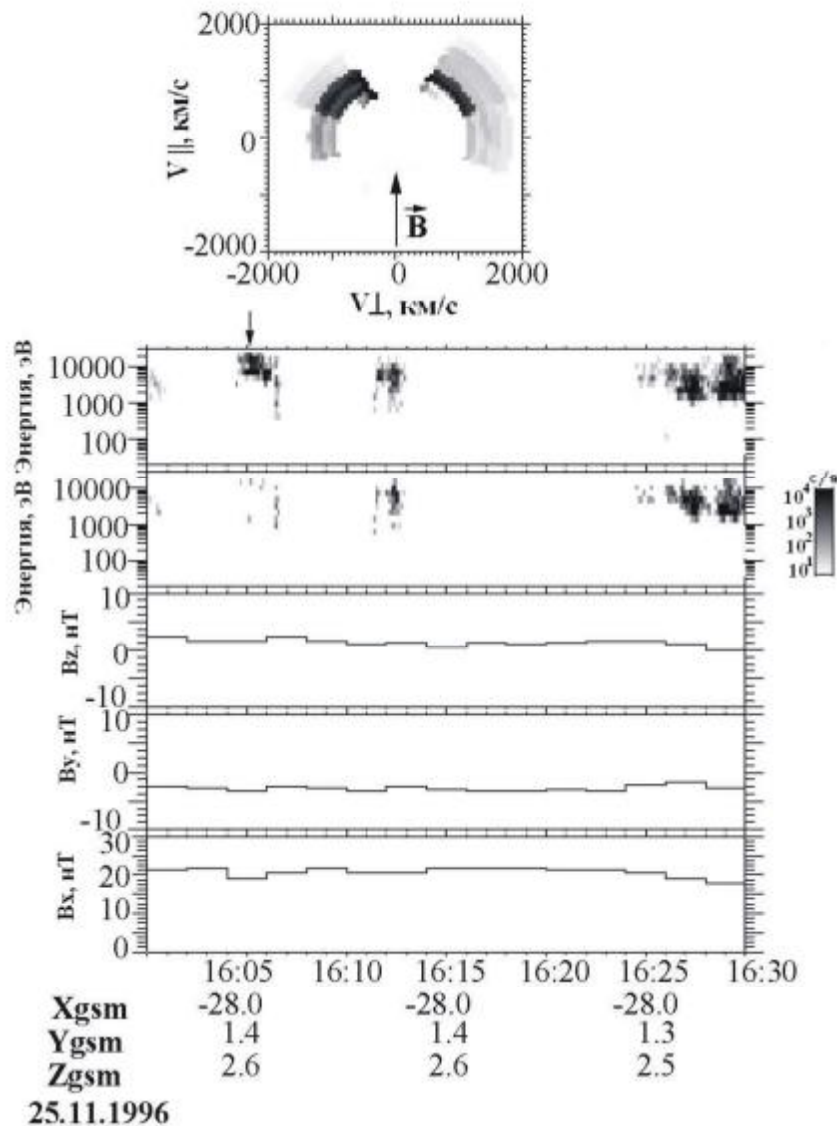


Рис.1. Экспериментальное наблюдение бимлета спутником Интербол-1 в ППС геомагнитного хвоста. *Сверху вниз*: функция распределения ионов по скоростям в плоскости $(V_{\perp}, V_{\parallel})$, измеренная в момент времени показанный стрелкой; спектрограммы ионов, движущихся к Земле и от Земли, компоненты магнитного поля в системе координат GSM.

2. Экспериментальные данные

Интербол-1, запущенный 3 августа 1995, был предназначен для исследования чрезвычайно важных и интересных, с точки зрения физики плазмы, пограничных слоев магнитосферы Земли, в том числе ППС. Его орбита, с первоначальным апогеем $30R_E$, перигеем 800км и наклоном 63^0 позволяла спутнику долгое время находиться в высокоширотных областях хвоста и в ППС. В данной работе мы проанализировали 70 пересечений ППС Интерболом-1 на расстоянии $X \sim -25R_E$ от Земли. Мы использовали данные измерений российских приборов: магнитного поля с магнитометра МИФ [5] и плазменных параметров, полученных с помощью ионного спектрометра КОРАЛЛ [9]. Ионный спектрометр КОРАЛЛ позволял производить измерения трехмерной функции распределения (без массового разрешения) за время ~ 2 мин (которое определялось периодом вращения аппарата вокруг своей оси). Также использовались данные по ММП с американского спутника Wind, которые были получены из Интернета (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>). При использовании измерений с Wind мы учитывали время распространения СВ от точки, где находился Wind до мест нахождения КА Интербол-1.

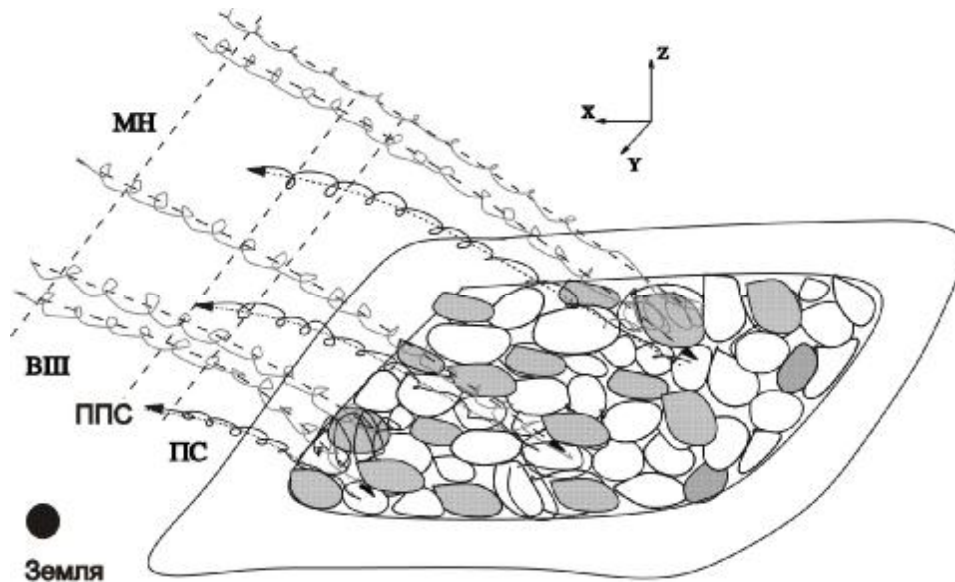


Рис.2. Схематическое изображение локализованного резонансного ускорения бимлетов в токовом слое (ТС) геомагнитного хвоста. Ионы, поступающие в ТС из мантии (МН), ускоряются в ТС и либо испытывают сильное рассеяние и захватываются в ТС (серые овалы), либо инжектируются в ППС практически без рассеяния (белые овалы).

3. Изучение влияния ММП на частоту появления и локализацию бимлетов в геомагнитном хвосте

Для статистического анализа пространственных распределений бимлетов в хвосте мы, прежде всего, выбрали интервалы, когда спутник Интербол-1 пересекал полуночный сектор геомагнитного хвоста ($|Y_{GSM}| \leq 7R_E$) и в спокойные геомагнитные интервалы (индекс $AE < 100$ нТ). В результате было выбрано 42 пересечения ППС в хвосте магнитосферы, удовлетворяющие этим условиям.

На рисунке 3 показаны спектрограммы, полученные методом наложения эпох, примененного ко всем выбранным пересечениям ППС в хвосте, имевшим место при южном (рис.3А) и северном направлениях ММП (рис.3Б). Имеются ввиду средние направления ММП, усредненные за час до каждого пересечения границы ППС. Спектрограммы построены в координатах dZ -Энергия, где dZ – расстояние между спутником и границей ПС (вдоль направления Z_{GSM}). Граница ПС определялась отдельно для каждого пересечения ППС согласно следующим критериям: 1) ионная температура $T_i > 1$ кэВ; 2) счет во всех 5 полярных каналах прибора КОРАЛЛ должен быть примерно одинаков (различия в счете не должны превышать 30%). Определив, таким образом,

границу ПС в каждом конкретном пролете, мы присваивали ей $dZ=0$, в результате, области с $dZ>0$ соответствует высокоширотная часть хвоста, а области с $dZ<0$ – внутренняя часть ПС. Верхние спектрограммы соответствуют данным, полученным с детектора, смотрящего в хвост, а нижние – данным с детектора, смотрящего на Солнце. На обеих верхних спектрограммах со стороны высокоширотной области четко видны движущиеся из хвоста бимлеты. Таким образом, статистически можно оценить размер области (вдоль направления Z_{GSM}), в пределах которой локализованы бимлеты. Он составляет $0.5 R_E$ для периодов южного ММП и $-0.15 R_E$ для периодов северного ММП.

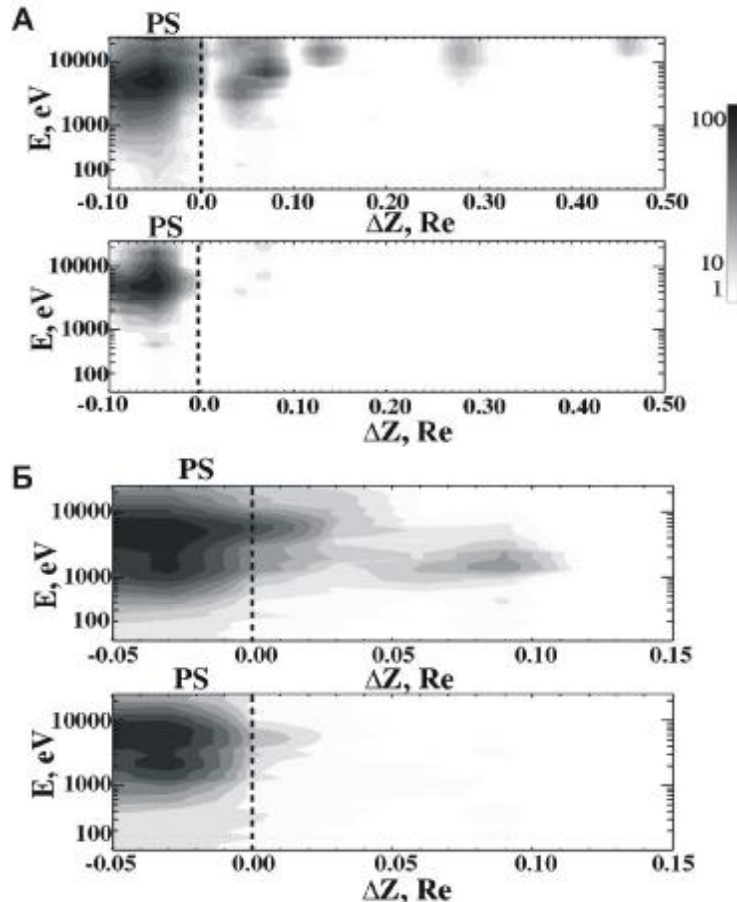


Рис.3. Ионные спектрограммы, построенные в координатах dZ -Энергия (где dZ – расстояние между спутником и границей ПС вдоль направления Z_{GSM}) полученные методом наложения эпох, примененного ко всем пересечениям ППС спутником Интербол-1 в геомагнитном хвосте во время интервалов южного ММП (А) и северного ММП (Б). Верхняя спектрограмма в каждой паре получена для ионов, движущихся к Земле, нижняя – для ионов, движущихся от Земли.

Для того чтобы выяснить, зависит ли частота появления бимлетов от предыстории направления ММП, мы использовали 70 пересечений ППС Интербол-1 (504 случаев наблюдений бимлетов) независимо от координаты Y и от уровня геомагнитной активности. Каждое пересечение ППС сканировалось с интервалом dt_i равным 10 минут и, независимо от того, наблюдались ли в это время бимлеты или нет, для каждого 10-минутного интервала определялось среднее направление ММП, усредненное за 1.5 часа до начала очередного dt_i . На Рис. 4 показаны распределения частоты наблюдения бимлетов в зависимости от определенного таким образом среднего направления ММП. Частота наблюдения бимлетов определялась следующим образом. Весь диапазон направлений ММП (рассматривалась ориентация ММП в плоскости YZ) разбивался на 30° интервалы (12 интервалов). Для каждого интервала определялось полное время (в часах) наблюдения данных направлений ММП (соответствующих этому интервалу) путем сложения соответствующих 10-минутных интервалов (независимо от того, наблюдались в этих интервалах бимлеты или нет). Затем определялось число бимлетов, которым

предшествовали направления ММП из данного интервала, и затем это число бимлетов делилось на полное время наблюдения ММП из данного интервала. Радиальный размер каждого сектора диаграммы пропорционален величине частоты появления бимлета при данном направлении ММП. Такие операции были выполнены отдельно для утреннего ($Y_{GSM} \leq -7R_E$), полуночного ($|Y_{GSM}| < 7R_E$) и вечернего ($Y_{GSM} \geq 7R_E$) секторов хвоста. Из рисунка видно, что в полуночном секторе хвоста частота появления бимлетов менее всего зависит от направления ММП: бимлеты наблюдаются при любых направлениях ММП, хотя при строго северном ММП частота их появления значительно меньше, чем при южном. Для флангов картина распределения частоты бимлетов несколько иная. В отличие от полуночного сектора, на флангах при сильном северном ММП бимлетов нет совсем. На вечернем фланге бимлетов не наблюдалось даже при сильном южном ММП. Зато при увеличении B_Y компонента ММП частота появления бимлетов на флангах возрастает, особенно четко это видно на утреннем фланге ($Y_{GSM} \leq -7R_E$).

Важно отметить, что мы пробовали и другие интервалы усреднения, а именно, 2ч, 1ч, 30мин, 15мин (соответствующие диаграммы не представлены), и обнаружили, что распределения сохраняют вид, показанный на рисунке 4 при усреднениях за периоды не менее 1 часа. Зависимость от направления ММП начинает смазываться при усреднениях за меньшие интервалы времени – за 30мин и за 15 мин. Таким образом, существует по-видимому, интегральный эффект влияния ММП на процессы, связанные с генерацией бимлетов.

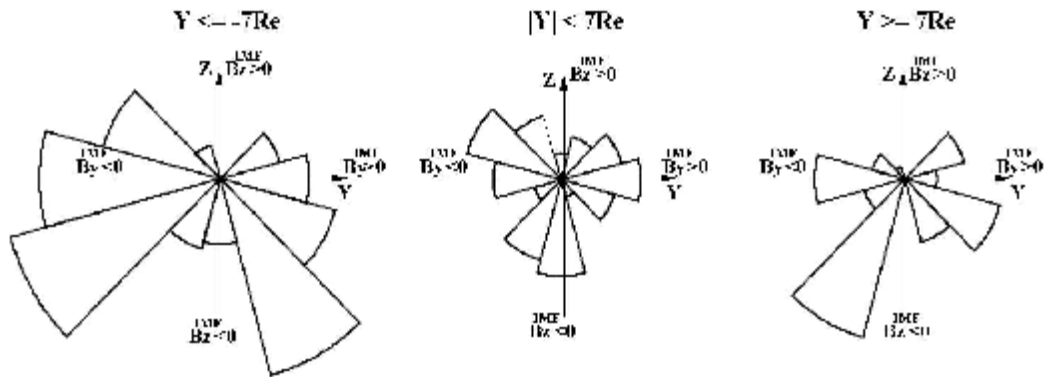


Рис.4. Распределения частоты наблюдения бимлетов в хвосте в зависимости от среднего направления ММП (часового угла в плоскости YZ_{GSM}). Диаграммы построены для трех секторов хвоста: утреннего, $Y_{GSM} \leq -7R_E$ (левый рисунок), полуночного, $|Y_{GSM}| < 7R_E$ (центральный рисунок) и вечернего, $Y_{GSM} \geq 7R_E$ (правый рисунок).

4. Выводы

1. Высокоскоростные пучки ионов (бимлеты) локализованы вблизи границы ПС, в области, размер которой вдоль направления Z_{GSM} зависит от среднего направления ММП и составляет для интервалов южного ММП $\sim 0.5 R_E$ и для периодов северного ММП лишь $\sim 0.15 R_E$.

Малый размер области локализации бимлетов при северном ММП, возможно, обусловлен отсутствием в эти периоды в ТС пространственно-протяженной области с малой величиной магнитного поля, которая имеет место в «вытянутой» магнитной конфигурацией хвоста. Поэтому в периоды северного ММП неадиабатическое ускорение частиц и генерация бимлетов (в тех редких случаях, когда они наблюдаются) происходит в пространственно-локализованной области вблизи сепаратрисы, разделяющей замкнутые и открытые силовые линии магнитного поля. В результате вблизи Земли бимлеты также будут локализованы вблизи узкой области, примыкающей к границе ПС. Напротив, при южном ММП возрастает вероятность возникновения «вытянутой» магнитной

конфигурацией хвоста с протяженной областью слабого магнитного поля, в которой возможно возникновение резонансных источников ускорения бимлетов. В результате, в периоды южного ММП бимлеты вблизи Земли будут локализованы в более широкой (вдоль Z_{GSM}) области.

2. Частота появления бимлетов в хвосте зависит от предыстории межпланетных условий, в частности, от среднего направления ММП, усредненного как минимум за 1 час до наблюдения бимлета. Причем, эта зависимость выглядит по-разному для полуночного сектора хвоста и для его флангов:

- В полуночном секторе бимлеты наблюдаются практически при всех направлениях ММП. При сильном северном поле частота их появления значительно меньше, чем при других направлениях ММП.
- При сильно северном ММП бимлетов на флангах не наблюдается. Возможно, это связано с тем, что при северном ММП электрическое поле утро-вечер, в котором ускоряются бимлеты, мало.
- Наибольшая частота появления бимлетов на флангах наблюдается, когда ММП имеет существенный V_Y компонент. Это может быть связано с формированием благоприятных условий для ускорения ионов в токовом слое на флангах. В частности, существуют указания на эффективное проникновение ионов СВ в хвост магнитосферы через фланги, особенно в присутствии в ММП V_Y компоненты [8].

В целом, наши результаты подтверждают модель резонансного ускорения плазмы в пространственно локализованных областях ТС, которые существуют в дальних областях геомагнитного хвоста даже при самых спокойных условиях. Бимлеты не обязательно связаны с пересоединением (то есть со сменой знака B_Z в ТС) – возможен и чисто неадиабатический механизм в областях со слабым квазистационарным $B_Z > 0$.

Благодарности

Работа была поддержана грантами РФФИ №№ 06-02-72561; 07-02-00319, грантом ведущих научных школ при Президенте РФ № НШ-5359.2006.2, INTAS Nr. 06-1000017-8943.

Список литературы

1. Ashour-Abdalla M., J.P. Berchem, J. Buchner, L.M. Zelenyi, Shaping of the magnetotail from the mantle: global and local structuring // *J. Geophys. Res.* 1993. 98. 5651.
2. Buchner J, L.M. Zelenyi, Regular and chaotic charged particle motion in magnetotail-like field reversals, 1. Basic theory of trapped motion // *J. Geophys. Res.* 1989. 94, 11,821.
3. Grigorenko E.E., A.O. Fedorov, L.M. Zelenyi. Statistical study of transient plasma structures in magnetotail lobes and plasma sheet boundary layer: Interball-1 observations // *Ann. Geophysicae.* 2002. 20,329.
4. E.E. Grigorenko, J.-A. Sauvaud, L.M. Zelenyi, Spatial-Temporal characteristics of ion beamlets in the plasma sheet boundary layer of magnetotail // *J. Geophys. Res.* 2007. 112, A05218, doi:10.1029/2006JA011986.
5. Klimov S., S. Romanov, E. Amata, J. Blecki, J. Buchner et al.. ASPI experiment: measurements of fields and waves onboard the Interball-1 spacecraft // *Annal. Geophysicae,* 1997. 15, 514.
6. Lyons L.R., T.W. Speiser, Evidence for current-sheet acceleration in the geomagnetic tail, // *J. Geophys. Res.* 1982. 87, 2276.
7. Parks G., L.J. Chen, M. McCarthy, D. Larson et al., New observations of ion beams in the plasma sheet boundary layer // *Geophys. Res. Lett.* 1998. 25, No. 17. P. 3285-3288.
8. Rostoker G., Phenomenology and physics of magnetospheric substorms // *J. Geophys. Res.* 1996. 101, 12, 955.
9. Yermolaev Yu.I., A.O. Fedorov, O.L. Vaisberg et al., Ion distribution dynamics near the Earth's bow shock: first measurements with the 2-D ion energy spectrometer CORALL on the Interball-Tail satellite // *Annal. Geophysicae.* 1997. 15, 533.