

УДК 537.591.5

О ПРОНИКНОВЕНИИ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МАГНИТОСФЕРУ ЗЕМЛИ 28 ЯНВАРЯ 2012 г.

© 2013 г. Н. А. Власова¹, Е. А. Гинзбург², В. В. Калегаев¹, И. Н. Мягкова¹, М. И. Панасюк¹,
И. А. Рубинштейн¹, М. О. Рязанцева¹, П. М. Свидский², В. И. Тулупов¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобелыцына МГУ им. М.В. Ломоносова

²Институт прикладной геофизики, г. Москва

nav19iv@gmail.com

Поступила в редакцию 07.11.2012 г.

Представлены результаты сравнительного анализа динамики потоков СКЛ с энергиями 1–100 МэВ в межпланетной среде по данным КА *ACE* и *Wind* и внутри магнитосферы Земли по данным ИСЗ *GOES-15* и *Электро-Л* в области геостационарной орбиты и ИСЗ *POES-19* и *Метеор-М1* в области полярных шапок во время двух возрастных СКЛ 19–31.I.2012. Показано, что наблюдавшееся 28.I.2012 уменьшение эффективности проникновения СКЛ в магнитосферу Земли в областях исследуемых орбит связано с прохождением магнитосферы Земли через структуру межпланетной среды с квази-радиальным межпланетным магнитным полем и небольшим давлением солнечного ветра.

DOI: 10.7868/S0023420613050099

ВВЕДЕНИЕ

Влияние Солнца посредством межпланетной среды (МС) на магнитосферу Земли (МЗ) сложно, многогранно и неоднозначно. МС – неоднородная и нестационарная структура. МЗ – сложная самоорганизующаяся система. “Концепция открытой магнитосферы” [1] – это наиболее известная и принятая современная основа физики солнечно-земных связей. Предполагается, что силовые линии МЗ временно пересоединяются с силовыми линиями межпланетного магнитного поля (ММП) при его южной ориентации (последние данные и ссылки на предысторию можно найти, например, в [2]). Величина B_z -компоненты ММП ответственна за скорость пересоединения, она оказывает влияние практически на все процессы, происходящие в МЗ (см., например, [3]). Компоненты B_y и B_x также играют определенную роль (см., например, [4, 5]). Выделяют разные уровни воздействия МС на МЗ [6]: однородное и стационарное течение МС имеет своим результатом структуру МЗ; однородное, но нестационарное течение МС вызывает геомагнитные возмущения; неоднородность и дискретность МС, полагают, может быть причиной геомагнитных суббурь [7]. Состояние МС влияет также на эффективность проникновения СКЛ из МС внутрь МЗ – процесса, который, как казалось, определяется только структурой и динамикой геомагнитного поля [8]. СКЛ используются для зондирования МС (см., например, [9, 10]), а также служат инструментом для исследования струк-

туры и состояния МЗ и солнечно-земных связей [11, 12].

Теория движения энергичных частиц в дипольном геомагнитном поле разработана Штёрмером [13]. Применение теории целесообразно для протонов с энергией, приблизительно, >10 МэВ [14], однако ее можно использовать и для меньших энергий. Сравнение теории с измерениями на космических аппаратах (КА) показали (см., например, [15, 16]), что СКЛ иногда проникают в МЗ значительно глубже, чем предсказано в теории Штёрмера, причем расхождение с расчетами (даже с расчетами по более современным моделям) увеличивается с ростом геомагнитной широты и уменьшением энергии частиц, особенно во время геомагнитных возмущений (см., например, [17, 18]). Для адекватного описания этого эффекта предложены эмпирические зависимости положения границы проникновения СКЛ от индексов геомагнитной возмущенности (см., например, [19]). Созданы методы расчета вертикальной жесткости обрезания в магнитном поле, учитывающие уровень геомагнитной возмущенности (см., например, [20]). Исследован эффект гистерезиса между главной фазой и фазой восстановления сильной магнитной бури в положении границ проникновения солнечных протонов в магнитосферу Земли [21].

Результаты экспериментальных исследований проникновения СКЛ в МЗ демонстрируют многообразие наблюдаемой картины (см., например, обзор [22] и ссылки в нем). Каталог солнечных

КА	Орбита	Энергия протонов, МэВ
<i>ACE</i> [www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/] [www.sec.noaa.gov/ftpdir/lists/ace]	Точка либрации L1 – 1.5 млн. км от Земли к Солнцу	>10 >30
<i>Wind</i> [http://wind.nasa.gov/mfi_swe_plot.php]	Вне магнитосферы Земли	19–28 28–72
<i>Метеор-М1</i> [http://smdc.sinp.msu.ru]	Полярная солнечно-синхронная; высота: ~820 км, наклонение: 98,8°	8–65
<i>POES-19</i> [poes.ngdc.noaa.gov]	Полярная солнечно-синхронная; высота: 800 км	>16 >36 >70
<i>Электро-Л</i> [http://smdc.sinp.msu.ru]	Геостационарная; высота: ~36000 км, долгота: 76°E	13.5–23 23–42 42–112
<i>GOES-15</i> [goes.ngdc.noaa.gov]	Геостационарная; высота: ~36000 км, наклонение: ~0°, долгота: 134°W	>1 >5 >10 >30 >50 >100

протонных событий [23], содержащий характеристики потоков СКЛ в момент максимума события, дает примеры разных соотношений величины потоков СКЛ в МС и внутри МЗ (сохранение, повышение или снижение), причем, в рамках каждого события, такое соотношение зависит от энергии регистрируемых частиц. В работе [24] приведено несколько случаев превышения потока СКЛ внутри МЗ на геостационарной орбите (ГСО) по сравнению с измерениями в МС и делается попытка объяснения полученного результата на основе теоремы Лиувилля. По результатам сравнительного анализа трех последовательных событий возрастания СКЛ в декабре 2006 г., в которых наблюдались три возможных случая соотношений потоков СКЛ в МС (J_{MC}) и МЗ ($J_{MЗ}$): $J_{MC} \sim J_{MЗ}$, $J_{MC} > J_{MЗ}$, $J_{MC} < J_{MЗ}$, и возражений СКЛ в январе 2005 г. в работе [8] сделано предположение, что существует ряд факторов, таких как направление вектора межпланетного магнитного поля, степень анизотропии потока СКЛ, близость к Земле дневной магнитопаузы и ее форма, которые определяют эффективность проникновения СКЛ из МС в МЗ.

Представленная работа посвящена сравнительному исследованию динамики потоков СКЛ в МС и внутри МЗ 19–31.I.2012 с целью выявить наиболее существенные факторы, влияющие на эффективность проникновения СКЛ с энергией 1–100 МэВ в МЗ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Источники информации о потоках СКЛ, использованных в данном исследовании, приведены в таблице.

На ИСЗ *Электро-Л* и *Метеор-М1* установлена научная аппаратура, разработанная и созданная в НИИЯФ МГУ. ИСЗ *Электро-Л* и *Метеор-М1* – российские космические аппараты гидрометеорологического назначения, запущенные на геостационарную орбиту 20.I.2011 года и на полярную солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 820 км в сентябре 2009 г., соответственно. На обоих спутниках установлены спектрометры, предназначенные для регистрации электронов и протонов радиационных поясов Земли и солнечных вспышек. На ИСЗ *Электро-Л* регистрация осуществляется в направлении перпендикулярном плоскости орбиты, на юг, а на ИСЗ *Метеор-М1* – в двух взаимно-перпендикулярных направлениях: в зенит и по вектору скорости. Спектрометры представляют собой телескопы из одного или двух проходных полупроводниковых детекторов и сцинтилляционных детекторов, между которыми может быть помещен поглотитель для обеспечения требуемого диапазона энергии. В качестве примера на рис. 1 представлен схематический чертеж спектрометра СКЛ-Э на ИСЗ *Электро-Л*:

полупроводниковый детектор Д1 (типа dE/dx) с толщиной чувствительного слоя ~300 мкм Si;

сцинтилляционный детектор Д2 на основе кристалла CsI(Tl) размером $h20 \times \varnothing 15$ мм;

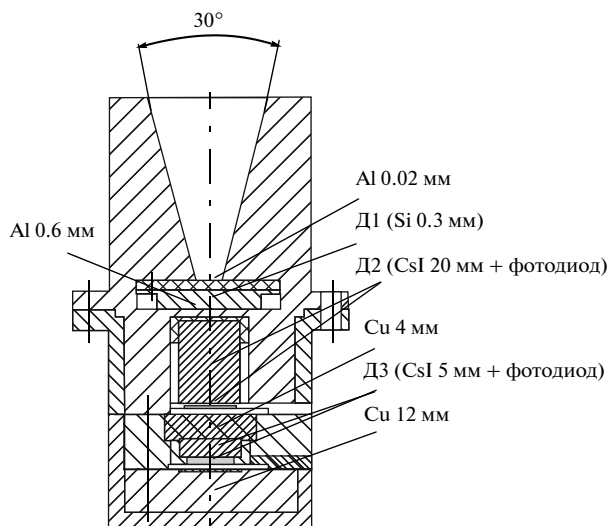


Рис. 1. Чертеж спектрометра СКЛ-Э.

сцинтилляционный детектор Д3, выполненный также на основе кристалла CsI(Tl), но размером $h5 \times \text{Ø}20$ мм.

Коллиматор выделяет конус обзора $\sim 30^\circ$. Каждый детектор расположен в отдельной упаковке, обеспечивающей удобство доступа для монтажа и калибровки. Секции выполнены из латуни и имеют толщину боковой защиты ~ 11 мм, ограничивающую проникновение протонов с энергией менее ~ 80 МэВ.

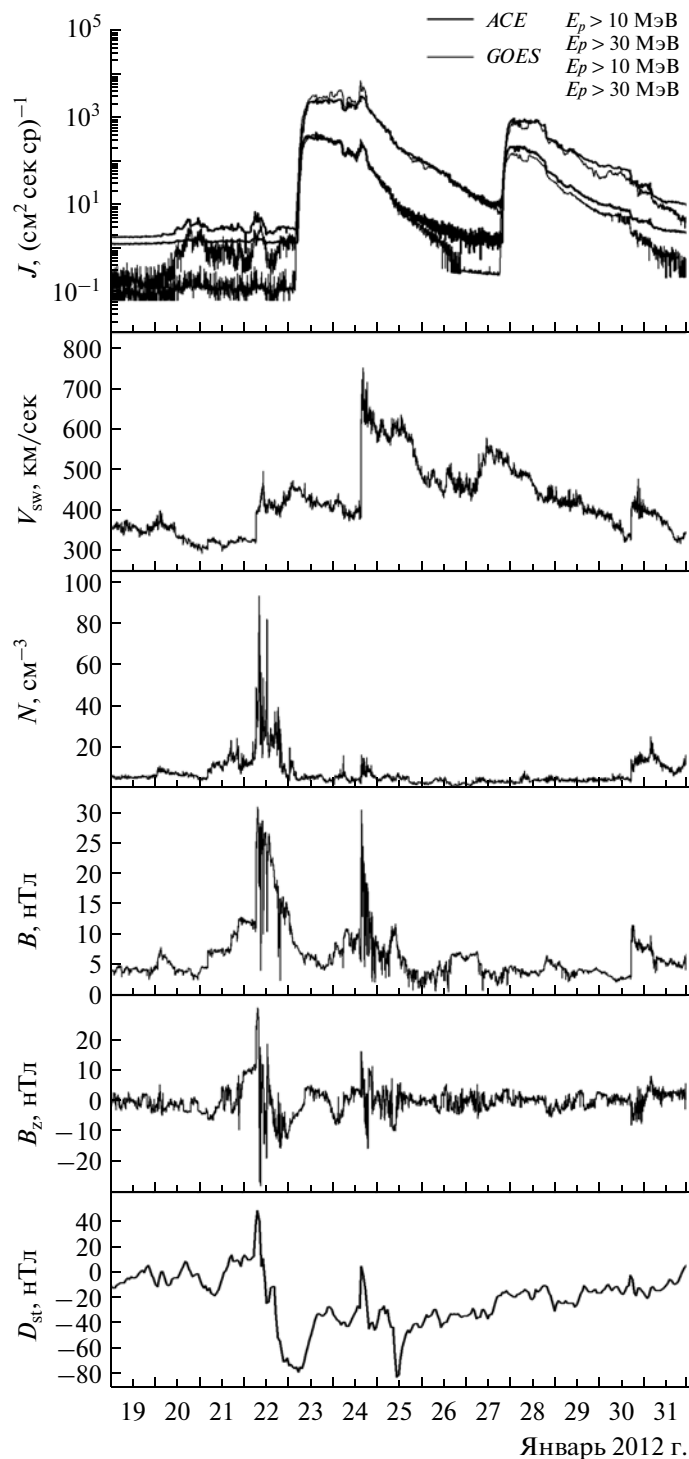
Входное окно детектора Д1 экранировано фольгой ~ 20 мкм Al. Для смещения энергетического диапазона протонов и электронов, регистрируемых Д2, между детекторами Д1 и Д2 устанавливается экран ~ 0.6 мм Al, и, таким образом, общая толщина защиты входного окна Д2 составляет ~ 1 мм Al.

Геометрический фактор спектрометра СКЛ-Э составляет $G \approx 0.1 \text{ см}^2 \text{ ср}$.

СОБЫТИЯ СКЛ В ЯНВАРЕ 2012 ГОДА

Возрастания СКЛ в январе 2012 г. — одни из первых событий 24-ого цикла солнечной активности. В период 19–31.I.2012 наблюдался ряд солнечных вспышек, три из которых были наиболее сильными и оказали существенное влияние на магнитосферу Земли. Все они произошли в активной области (АО) № 1402 во время ее нахождения на видимой стороне Солнца.

19.I в АО 1402 была зарегистрирована солнечная вспышка с началом в 13.44 UT балла (M3.2/2N) с гелиокоординатами N29E15. Она была источником коронального выброса массы (КВМ) и связанной с ним ударной волны. Фронт ударной волны с плотностью солнечного ветра (СВ) до 80 ча-

Рис. 2. Временные профили потоков СКЛ, скорости, плотности СВ, модуля и B_z -компоненты ММП.

стиц в см^3 и скоростью плазмы СВ до 500 км/с достиг Земли в 06.14 UT 22.I (на КА ACE он был зарегистрирован в 05.14 UT). Временные профили скорости и плотности СВ, а также модуля и B_z -компоненты ММП по данным КА Wind представлены на рис. 2. В ~ 08 UT было зарегистрировано

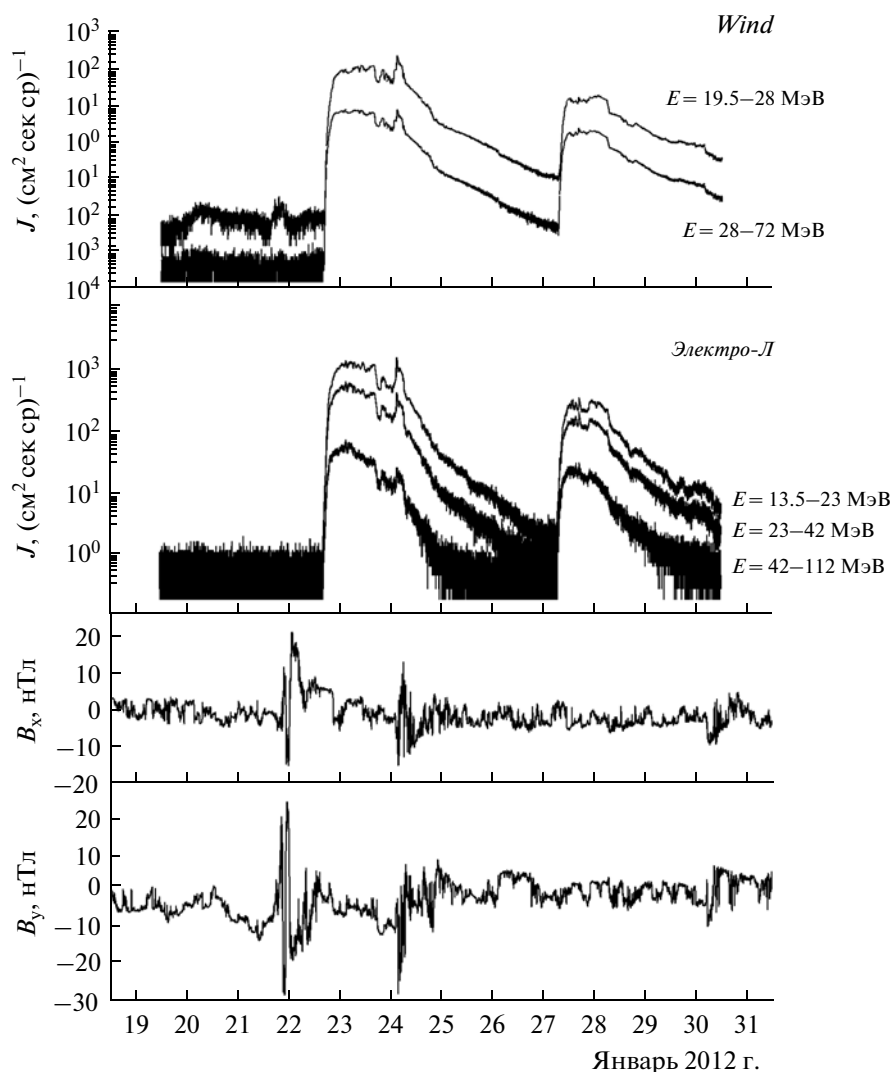


Рис. 3. Временные профили потоков СКЛ, B_x - и B_y -компонент ММП.

SC с амплитудой 49 нТл, за которым последовала магнитная буря с $D_{st\min} = -78$ нТл.

Большое возрастание СКЛ 23.I связывается с солнечной вспышкой 23.I в 03.38 UT балла (M8.7/2B) с гелиокоординатами N28W36. Временные профили потоков солнечных протонов с энергией >10 и >30 МэВ по данным КА ACE и ИСЗ GOES-15 представлены на рис. 2. Для синхронизации вариаций потоков со спутников данные КА ACE сдвинуты по времени (вперед) на 1 час 10 мин, а данные КА Wind — на 44 мин относительно данных ИСЗ GOES-15 как на рис. 2, так и на последующих рисунках. Аналогичные временные профили солнечных протонов в нескольких дифференциальных каналах по данным КА Wind и ИСЗ Электро-Л представлены на рис. 3.

24.I в ~ 15 UT окрестности Земли достиг КВМ с ударной волной от данной вспышки, что проявилось всплеском интенсивности СКЛ вблизи

максимума их временного распределения (рис. 2, 3). Скорость СВ при этом скачком возросла до ~ 700 км/с, плотность СВ увеличилась от ~ 3 до ~ 15 частиц в см^3 , а давление СВ — от 1 до 10 нПа. Тем не менее, поскольку величина B_z -компоненты ММП была неглубоко отрицательной и лишь в короткие интервалы времени, магнитосфера откликнулась кратковременной положительной вариацией D_{st} , а уменьшилась D_{st} до -82 нТл только 25.I, когда B_z -компонента имела устойчивую южную ориентацию (~ -10 нТл) в течение двух часов. 24.I K_p возрос до 5, а амплитуда AE-индекса, характеризующая суббуревую активность, достигла 1400 нТл.

В начале 27.I окрестности Земли достиг высокоскоростной поток СВ (до 560 км/с, см. рис. 2), источником которого, скорее всего, была большая корональная дыра, появившаяся на юго-восточном лимбе Солнца 19.I.

Возрастание СКЛ 27.I связывается с солнечной вспышкой 27.I в 17.37 UT балла (X1.7) с гелиокоординатами N33W85. Усиления геомагнитной возмущенности не наблюдалось, продолжалась фаза восстановления предыдущей геомагнитной бури. Ударная волна с КВМ от данной вспышки, характеризующаяся ростом скорости и плотности СВ, а также модуля ММП, пришла к Земле 30.I в ~17 UT (рис. 2).

Как следует из рис. 2 и рис. 3, период 23–27.I.2012 характеризовался сильными возмущениями и большими амплитудами вариаций всех параметров МС, а в МЗ – геомагнитной бурей. Период 28–29.I.2012 практически спокойный: скорость СВ уменьшается, нет больших амплитуд вариаций параметров МС, а в МЗ – фаза восстановления магнитной бури.

Возрастания СКЛ, начавшиеся 22. и 27.I, ассоциировались со вспышками на западной стороне диска Солнца и характеризовались быстрым приходом к Земле и крутым фронтом нарастания потоков СКЛ, а, следовательно, в максимумах возрастаний СКЛ поток частиц мог быть анизотропен. Временные профили потоков СКЛ (рис. 2 и 3), зарегистрированных в МС (на КА *ACE* и *Wind*) и внутри МЗ в области ГСО (на ИСЗ *GOES-15* и *Электро-Л*) практически подобны, но в максимуме возрастания потоков СКЛ 28.I с ~06 по ~10 UT поток СКЛ, измеренный в МЗ, был, примерно, на 30% меньше потока, измеренного в МС. Эффект уменьшения потока в магнитосфере не является местным, так как получены аналогичные результаты и на ИСЗ *GOES-15*, и на ИСЗ *Электро-Л*, которые в этот период находились в ночном (с ~21 по ~01 MLT) и в дневном (с ~11 по ~15 MLT) секторах магнитосферы, соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно теории движения энергичных частиц в дипольном геомагнитном поле [13] и по расчетам вертикальной жесткости обрезания в геомагнитном поле [20] СКЛ МэВ-ных энергий могут пройти в МЗ поперек силовых линий не только в области полярных шапок, но и на ГСО. Влияние МС на проникновение СКЛ в МЗ рассматривалось в рамках исследования динамики границ проникновения в зависимости от индексов геомагнитной активности (см., например, [25]) и от величины давления солнечного ветра (см., например, [26]). В рамках существующих моделей не предусматривается возможность уменьшения эффективности проникновения СКЛ. В работе [8] из рассмотрения проекции движения энергичных заряженных частиц на плоскость геомагнитного экватора приведены условия для наиболее глубокого проникновения протонов СКЛ в МЗ: оптимальным местом при их влете с дневной стороны является самая приближенная к

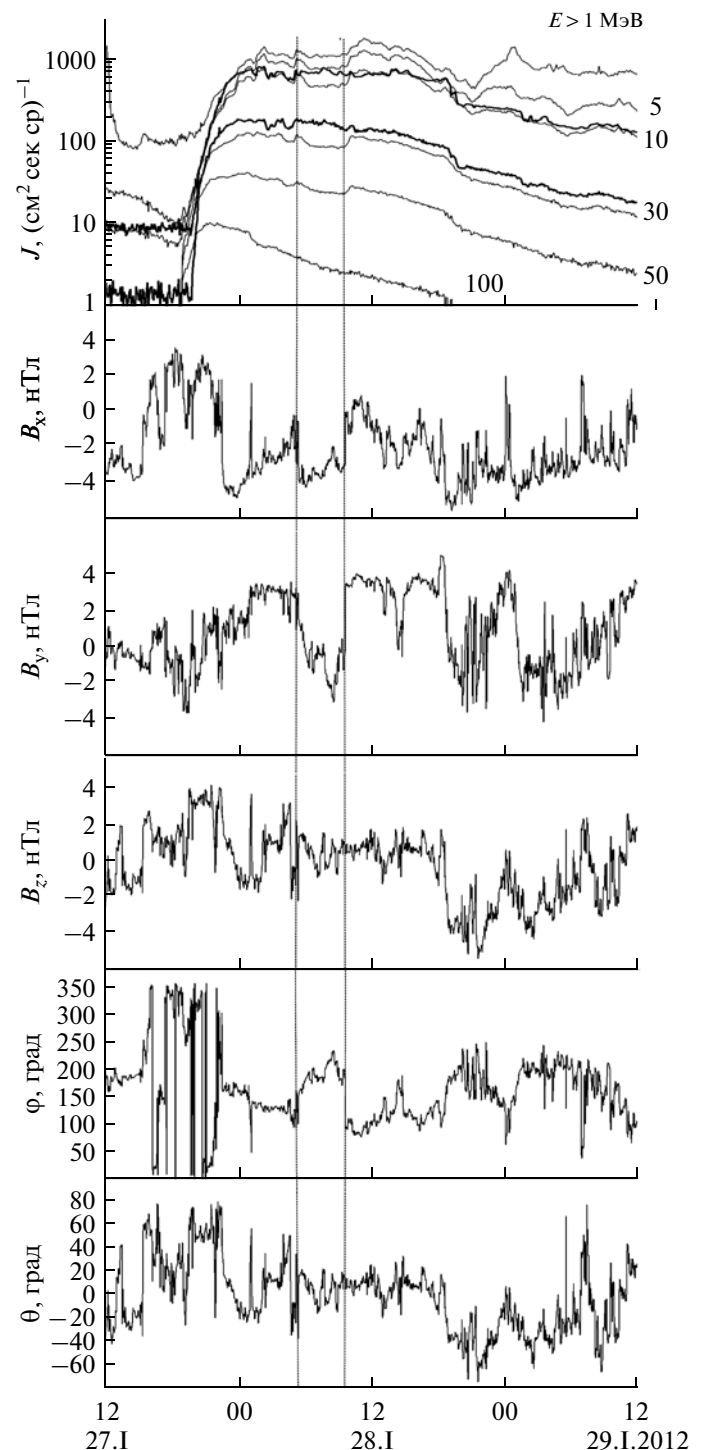


Рис. 4. Временные профили потоков СКЛ, компонент ММП и углов сферической системы координат, определяющих направление ММП.

Земле область магнитопаузы (например, подсолнечная зона), причем частицы должны пересекать магнитопаузу по линии близкой к касательной к магнитопаузе в направлении с востока на запад. Приближение магнитопаузы к Земле ведет

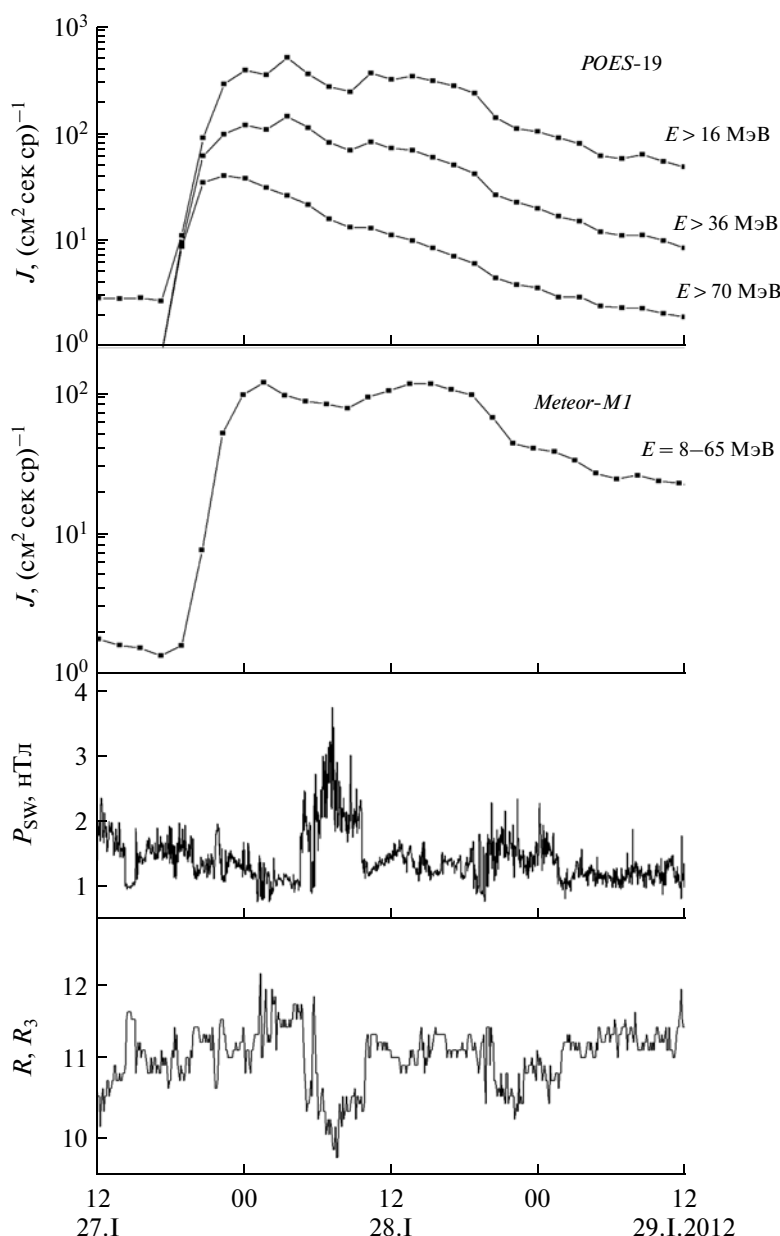


Рис. 5. Временные профили усредненных по области северной ПШ величин потоков СКЛ, давления СВ и положения подсолнечной точки магнитопаузы.

к углублению точки максимально возможного проникновения, и наоборот. Статистическая эффективность проникновения зависит от того, в какой мере межпланетное магнитное поле обеспечивает подвод потока частиц к указанной области под указанным углом — для анизотропного потока СКЛ — и/или в каком процентном отношении представлены частицы указанного направления в потоке с высокой угловой изотропией.

28.I с ~06 по ~10 UT МЗ проходила через структуру МС (рис. 4, область между вертикальными линиями). Вход и выход из структуры ха-

рактеризуется быстрыми изменениями параметров МС. Величина потока СКЛ в МС 28.I с ~06 по ~10 UT по данным КА ACE (полужирные линии) практически не изменяется. Величина потока СКЛ в МЗ по данным ИСЗ GOES-15 (тонкие линии), начиная со времени входа МЗ в структуру МС, постепенно, в течение ~1 часа, уменьшается и затем остается практически неизменной, на ~30% меньше величины потока СКЛ в МС, до выхода МЗ из структуры МС. После чего начинается увеличение потока и достижение величины потока в МС в течение ~1 часа. Эффект уменьшения величины потока СКЛ не наблюдается на

временном профиле потока частиц с энергией >100 МэВ по данным ИСЗ *GOES-15*.

По данным ИСЗ *POES-19* и *Метеор-М1* (рис. 5) уменьшение эффективности проникновения СКЛ из МС в МЗ существует и в полярных областях МЗ. Локальное уменьшение потока наблюдается на профилях усредненных по области ПШ потоков частиц с $E > 16$ МэВ и $E > 36$ МэВ, но практически не проявляется на профиле потока частиц с $E > 70$ МэВ (данные ИСЗ *POES-19*).

Структура МС характеризовалась ярко выраженными, но небольшими по величине и по амплитуде вариациями параметров МС: небольшим увеличением плотности СВ (от ~ 3 до ~ 5 частиц в см³) по сравнению с предшествующим временем; давление солнечного ветра составляло ~ 2.6 нТл; при небольших вариациях величины B_z -компоненты ММП около 0-вого значения (от ~ -1 до ~ 1.5 нТл) наблюдается уменьшение величин B_x - и B_y -компонент до небольших отрицательных значений (~ -3 и ~ -1 нТл, соответственно). Вектор ММП находился в секторе $-X$, $-Y$ системы GSM, с вариациями угла ϕ (рис. 4) к направлению на Солнце в интервале $180^\circ - 240^\circ$.

Согласно расчетам, выполненным по модели [27], с использованием величин усредненных часовых параметров СВ по данным КА *Wind*, положение подсолнечной точки магнитопаузы (R — в радиусах Земли) во время прохождения МЗ через структуру МС составляло в среднем $\sim 10.5 R_3$ (рис. 4). Но в работе [28] представлены результаты исследования класса квази-стационарных событий, когда длительное воздействие (несколько часов) межпланетного магнитного поля, сопоставленного с потоком плазмы солнечного ветра (квази-радиальное поле), приводит к такому же длительному глобальному расширению магнитосферы. Размеры магнитосферы могут увеличиться до 30% от ожидаемых, так как формирование переходного слоя в квази-радиальном поле сопровождается аномально низким давлением плазмы, которое может составлять только 20% от динамического давления солнечного ветра. 28.I. с ~ 06 по ~ 10 UT, когда МЗ проходила через структуру МС, направление ММП можно считать квази-радиальным, а давление солнечного ветра было небольшим. В работе [8] исследованы три случая уменьшения эффективности проникновения СКЛ в МЗ на ГСО, наблюдавшиеся 13.XII в 2006 г. и 15 и 20.I в 2005 г. в максимумах возрастания СКЛ. Условия в МС в исследуемые периоды времени были близки условиям в структуре МС 28.I.2012. Причиной уменьшения эффективности проникновения СКЛ в МЗ может быть увеличение размеров магнитосферы и, как следствие, невозможность для части частиц с небольшой энергией достичь областей исследуемых орбит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

28.I.2012 с ~ 06 до ~ 10 UT при прохождении магнитосферы Земли через структуру межпланетной среды, характеризующуюся квази-радиальным ММП и низким давлением солнечного ветра, обнаружено уменьшение на $\sim 30\%$ эффективности проникновения СКЛ в магнитосферу Земли. Получено, что время, необходимое в данном случае для установления равновесия между состоянием магнитосферы Земли и изменившимися условиями в межпланетной среде, составляет порядка 1 часа. Причиной уменьшения потока СКЛ в магнитосфере Земли по сравнению с межпланетной средой может быть расширение магнитосферы и, как следствие, невозможность части частиц с энергией < 70 МэВ достичь областей исследуемых орбит.

Авторы благодарны участникам проектов *ACE*, *POES*, *GOES*, *Wind*, *SEC/NOAA*, *WDC-C2 Kyoto* за возможность интернет-доступа к данным, Н.Н. Павлову за обсуждение проблем проникновения, Г.П. Любимову за важные замечания и полезные обсуждения. И.Н. Мягкова и М.О. Рязанцева благодарят Министерство образования и науки РФ, проект № 2012-1.2.2-12-000-1012-003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dungey J.W.* Interplanetary magnetic field and the auroral zones // *Phys. Rev. Lett.* 1961. V. 6. № 2. P. 47–48.
2. *Merkin V.G., Goodrich C.C.* Does the polar cap area saturate? // *Geophys. Res. Letters*. 2007. V. 34. L09107. doi:10.1029/2007GL029357.
3. *Lemaire J.F., Batteux S.G., Slypen I.N.* The influence of a southward and northward turning of the interplanetary magnetic field on the geomagnetic cut-off of cosmic rays, on the mirror points positions of geomagnetically trapped particles, and on their rate of precipitations in the atmosphere // *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2005. V. 67. P. 719–727.
4. *Akasofu S.-I.* Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // *Space Sci. Rev.* 1981. V. 28. P. 121–190.
5. *Беленькая Е.С.* Структура магнитосферного магнитного поля при различных направлениях магнитного поля солнечного ветра // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2004. Т. 44. № 4. С. 435–441.
6. *Любимов Г.П., Власова Н.А., Тулунов В.И. и др.* Некоторые особенности потока солнечных космических лучей и геомагнитных условий 05–18 декабря 2006 года // *Космич. исслед.* 2011. Т. 49. № 6. С. 491–499. (*Cosmic Research*. P. 477).
7. *Borovsky J.E.* Flux tube texture of the solar wind: Strands of the magnetic carpet at 1 AU? // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A08110. doi:10.1029/2007JA012684.
8. *Власова Н.А., Павлов Н.Н., Панасюк М.И. и др.* Некоторые особенности проникновения солнечных космических лучей в магнитосферу Земли: 5–

- 17 декабря 2006 г. // Космич. исслед. 2011. Т. 49. № 6. С. 500–515. (Cosmic Research. P. 485).
9. Вернов С.Н., Тверской Б.А., Любимов Г.П. и др. Вариации интенсивности космических лучей и солнечный ветер // Известия АН СССР. Сер. физ. 1975. Т. 39. № 2. С. 340.
10. Любимов Г.П. Диагностическая методика исследования межпланетного магнитного поля, плазмы солнечного ветра и их источников на Солнце // Известия АН. Сер. физ. 2003. Т. 67. № 3. С. 353
11. Вернов С.Н., Иванова Т.А., Кузнецов С.Н. и др. Регистрация солнечных космических лучей одновременно вблизи Венеры и в магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1973. Т. 13. № 1. С. 164–166.
12. Дарчиева Л.А., Иванова Т.А., Коврыгина Л.М. и др. Диагностика состояния магнитосферы по данным о солнечных космических лучах // Геомагнетизм и аэрономия. 1983. Т. 23. № 1. С. 62–67.
13. Störmer C. The Polar Aurora. Oxford Univ. Press, 1955.
14. Фельтхаммар К.Г. Движение заряженных частиц в магнитосфере // Космическая геофизика / Ред. Эгеланд А., Холтер О., Омхольт А. М.: Мир, 1976. С. 182.
15. Van Allen J.A., Lin W.C. Outer radiation belt and solar proton observations with Explorer VII during March–April 1960 // J. Geophys. Res. 1960. V. 65. P. 2998–3003.
16. Дарчиева Л.А., Иванова Т.А., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Динамика экваториальных и полярных границ проникновения солнечных протонов с энергией ~1 МэВ в магнитосферу во время сильной магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. № 6. С. 856–858.
17. Дарчиева Л.А., Иванова Т.А., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Вариации широты геомагнитного обрезания солнечных протонов во время сильных геомагнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. Т. 18. № 6. С. 1007–1008.
18. Rodger C.J., Clilverd M.A., Verronen P.T. et al. Dynamic geomagnetic rigidity cutoff variations during a solar proton event // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A04222. doi:10.1029/2005JA011395.
19. Иванова Т.А., Кузнецов С.Н., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Динамика низкоширотной границы проникновения в магнитосферу солнечных протонов малых энергий // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25. № 1. С. 7–12.
20. Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Петрухин В.В., Юшков Б.Ю. Метод расчета вертикальной жесткости обрезания в магнитном поле // Космич. исслед. 2009. Т. 47. № 3. С. 211–218. (Cosmic Research. P. 191).
21. Тверская Л.В. Диагностика магнитосферы по релятивистским электронам внешнего пояса и проникновению солнечных протонов // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51. № 1. С. 8–24.
22. Переяслова Н.К. Солнечные протоны в магнитосфере Земли // Энергичные частицы в магнитосфере Земли. АН СССР ПГИ. Апатиты, 1982. С. 3–25.
23. Каталог энергетических спектров солнечных протонных событий 1970–1979 гг. / Ред. Логачев Ю.И. М.: ИЗМИРАН, 1986.
24. Клименко В.В. О количественном соответствии потока солнечных протонов измеренного вне и внутри магнитосферы Земли // Космич. исслед. 1981. № 5. Т. 19. С. 775–777.
25. Кузнецов С.Н., Юшков Б.Ю., Денисов Ю.И. и др. Динамика границы проникновения солнечных космических лучей в магнитосферу Земли по данным ИСЗ КОРОНАС-Ф // Астрономический вестник. 2007. Т. 41. № 4. С. 360–365.
26. Birch M.J., Hargreaves J.K., Senior A., Bromage J.I. Variations in cutoff latitude during selected solar energetic proton events // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. A07221.
27. Shue J.-H., Song P., Russel C.T. et al. Magnetopause location under extreme solar wind conditions // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 17691–17700. doi:10.1029/98JA01103.
28. Suvorova A.V., Shue J.-H., Dmitriev A.V. et al. Magnetopause expansions for quasi-radial interplanetary magnetic field: THEMIS and Geotail observations // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A1021. doi:10.1029/2010JA015404.