Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 250–253.

УДК 550.385.37
DOI 10.62955/0135-3748-2026-250
ORCID 0009-0004-8255-5137

ДИНАМИКА ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЛИТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ 8 ЯНВАРЯ 2018 Г.

А.А. Зыкина, В.В. Калегаев, Н.А. Власова

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
anya.zykina@gmail.com

DYNAMICS OF RELATIVISTIC ELECTRON FLUXES IN THE OUTER RADIATION BELT UNDER THE INFLUENCE OF A LONG-TERM PRESSURE PULSE ON JANUARY 8, 2018

A.A. Zykina, V.V. Kalegaev, N.A. Vlasova

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, anya.zykina@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты исследования динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли под воздействием продолжительного (около 7 часов) импульса давления 8 января 2018 года. Проведен анализ вариаций параметров межпланетной среды и отклика внешнего радиационного пояса на внешнее воздействие. Работа основана на экспериментальных данных о потоках релятивистских электронов, полученных с геостационарного ИСЗ GOES и с КА Van Allen Probes (VAP-A и VAP-B), орбита которых проходит через сердцевину внешнего радиационного пояса вблизи экваториальной плоскости.

Событие началось в 6:46 UT с резкого сжатия магнитосферы (расстояние до подсолнечной точки уменьшилось на 3Re меньше, чем за минуту), что было спровоцировано приходом импульса давления солнечного ветра. Повышенное в 4 раза давление сохранялось еще около 6 часов, все это время магнитосфера находилась в сжатом состоянии. По данным VAP-A были построены пространственно-временные профили потоков электронов с энергиями 0,1-2,7 МэВ, для всех энергий в 6:46 было зафиксировано возрастание потока – реакция на сжатие магнитосферы.

Так же для энергий электронов 1-2,7 МэВ после начала события наблюдаются повторяющиеся кратковременные возрастания потоков на расстоянии 4-5 L. Период повторения возрастаний потоков различен для каждой энергии. Причиной этого могло быть возникшее электрическое поле. Электроны были зафиксированы VAP-A несколько раз повторно с периодом, совпадающим с теоретическим периодом дрейфа различным для каждой энергии. Эти «пики» в потоках электронов были зарегистрированы в течении всего 6-часового события на обоих КА VAP при каждом прохождении через область ~3.5-4.5 L. Быстрое сжатие магнитосферы может считаться одним источников ускорения электронов радиационных поясов.

Ключевые слова: магнитосфера Земли, внешний электронный радиационный пояс Земли, импульс давления.

Abstract. The results of a study of the dynamics of relativistic electron fluxes in the Earth's outer radiation belt under the influence of a prolonged (about 7 hours) pressure pulse on January 8, 2018 are presented. The analysis of variations in the parameters of the interplanetary medium and the response of the outer radiation belt to external influences is carried out. The work is based on experimental data on the fluxes of relativistic electrons obtained from the GOES geostationary satellite and the Van Allen Probes spacecraft (VAP-A and VAP-B), whose orbit passes through the core of the outer radiation belt near the equatorial plane.

The event began at 6:46 UT with a sharp compression of the magnetosphere (the distance to the subsolar point decreased by 3L in less than a minute), which was triggered by the arrival of a pulse of solar wind pressure. The 4-fold increased pressure persisted for about 6 more hours; during this time, the magnetosphere was in a compressed state. According to the VAP-A data, spatiotemporal profiles of electron fluxes with energies of 0.1-2.7 MeV were constructed. For all energies, an increase in the flux was recorded at 6:46 UT, which was a reaction to the compression of the magnetosphere.

Similarly, for electron energies of 1-2.7 MeV, repeated short-term increases in fluxes at a distance of 4-5 L are observed after the start of the event. The period of repetition of the flow increases is different for each energy. The reason for this could be an electric field. The electrons were fixed by VAP-A several times repeatedly with a period coinciding with the theoretical drift period, which is different for each energy. These "peaks" in electron fluxes were recorded during the entire 6-hour event on both VAP spacecraft with each passage through the ~3.5-4.5 L region.

Keywords: Earth's magnetosphere, Earth's outer electron radiation belt, pressure pulse.

ВВЕДЕНИЕ

Радиационные пояса Земли (РПЗ) — это области в околоземном пространстве, в которых регистрируются повышенные потоки заряженных частиц, захваченных геомагнитным полем. Различают два РП: внутренний, который достаточно стабилен, и внешний, который крайне динамичен и меняется под воздействием вариаций солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП). РП существуют благодаря наличию достаточно сильного внутреннего, квазидипольного магнитного поля и замкнутости его силовых линий.

В динамике внешнего РП заметна значительная роль скорости СВ [Paulikas, Blake, 1979], а также южной ориентации ММП [Blake, 1997]. Воздействие высокоскоростных потоков и ММП южной ориентации связано с усиленным поступлением энергии из межпланетной среды в магнитосферу и с

инициацией магнитосферных возмущений. Особая ситуация возникает в магнитосфере, когда на нее воздействуют мощные импульсы давления СВ с очень крутым передним фронтом, которые приводят к сжатию магнитосферы и к понижению потоков электронов внешнего РП [Калегаев и др., 2006].

В исследовании [Foster et al, 2015] на основе данных двух спутников Van Allen Probes анализируется влияние ударной волны СВ на магнитосферу Земли 8 октября 2013 г. Авторы выявили, что ударно-индуцированное электрическое поле, распространявшееся в дневной части магнитосферы, избирательно ускоряло электроны с энергией 3–4 МэВ благодаря согласованию их дрейфовой скорости с фазовой скоростью волны. Показано, что быстрое (меньше 20 мин) увеличение потоков релятивистских электронов внешнего РП (L*~3.5–4.0) происходит за счет импульсного ускорения индукционным электрическим полем удара и последующих диффузионных процессов при взаимодействии с УНЧ-волнами. Таким образом, механизм дрейфового резонанса с ударной волной признается значимым для генерации высокорелятивистских электронов во внутренней части внешнего РП.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Работа основана на результатах анализа экспериментальных данных по потокам электронов внешнего РПЗ, полученных с космического аппарата (КА) Van Allen Probes (VAP) [http://vanallenprobes.jhuapl.edu] и с геостационарного ИСЗ GOES-15 и GOES-14. Для исследования состояния межпланетной среды использовались экспериментальные данные КА ACE [https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/].

Магнитосферная активность Земли характеризовалась магнитными индексами *Dst* и *AL* [http://wdc.kugi.kyoto u.ac.jp/wdc/Sec3.html]. На сайте ЦДОКМ «Космическая погода» [https://swx.sinp.msu.ru/] собраны данные, необходимые для оценки и анализа радиационной обстановки не только в околоземном космическом пространстве, но и в межпланетной среде.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Исследуется событие 8 января 2018 г. В 6:46 UT на орбиту Земли приходит импульс СВ. Увеличенное в среднем в четыре раза давление сохраняется 6–7 ч (рис. 1). Все это время B_z-компонента ММП преимущественно положительна. Параметры СВ все равно остаются на спокойном уровне. Реакцией магнитосферы на импульс давления стало резкое сжатие (расстояние до подсолнечной точки уменьшилось на $3R_E$ меньше, чем за 1 мин). Магнитосфера оставалась в таком состоянии на протяжении всего события. С 6:46 UT с приходом импульса давления индекс *SYM/H* начинает увеличиваться, за 6 мин достигая +30 нТл. Это связано с усилением токов на магнитопаузе. Его значение в диапазоне 20–30 нТл сохраняется в течение всего события.

Интегральные потоки электронов на геостационарной орбите для трех спутников показаны на рис. 2. Потоки электронов на ELECTRO L2 реагируют одновременно с приходом импульса давления СВ, а для обоих спутников GOES есть задержка около 3–4 мин. Дневная часть магнитосферы раньше начинает меняться вследствие сжатия.

Кроме геостационарных спутников, использовались данные с КА Van Allen Probes. В 6:46 UT RBSP-A находился на расстоянии $4.5R_E$ от центра Земли, MLT~7 h. RBSP-B находился на $5.5R_E$, MLT~11 h. На обоих спутниках VAP были зарегистрированы скачки B_x и B_z-компонент магнитного поля в 6:46 в течение 1–2 мин, что связано с резким сжатием магнитосферы. Дальнейшее увеличение B_z на 30 нТл согласуется с поведением *SYM/H* и имеет ту же причину — усиление токов на магнитопаузе.

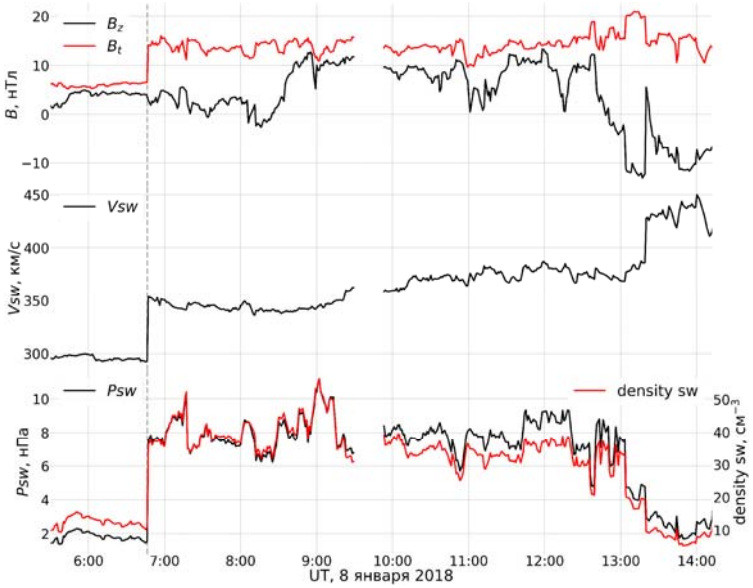

Рис. 1 Временные профили параметров СВ (скорость, давление, плотность) на орбите Земли. Вертикальная линия соответствуют времени 6:46 UT

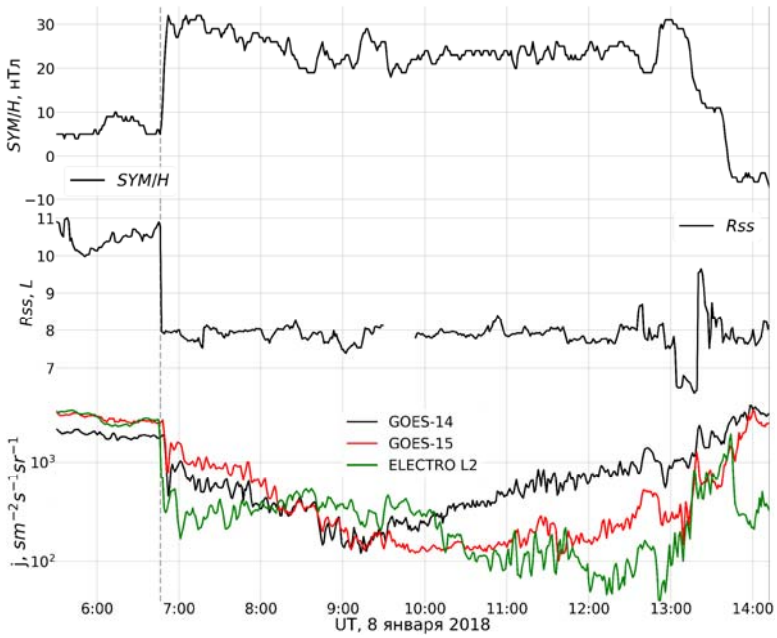

Рис. 2. Временные профили *SYM/H*, расстояния до подсолнечной точки, потоков электронов с энергией больше 0.8 МэВ на геостационарной орбите по данным с двух спутников (MLT ≈ 22–24 h) и потока электронов с энергией больше 0.6 МэВ со спутника ELECTRO L2 (MLT = 12 h)

По данным RBSP-A дифференциальные потоки электронов с энергиями от 100 кэВ до 2.7 МэВ начинают возрастать с началом события (рис. 3), возрастание длится 2–3 мин. Также для электронов с энергиями больше 1 МэВ наблюдаются кратковременные повторяющиеся возрастания потоков. На рис. 3 показан пространственно-временной профиль дифференциальных потоков электронов по данным RBSP-A. На этом промежутке КА движется к Земле, следовательно с увеличением времени расстояние до Земли уменьшается. Первый пик наблюдается для энергии 2.7 МэВ, затем последовательно по времени с уменьшением энергии.

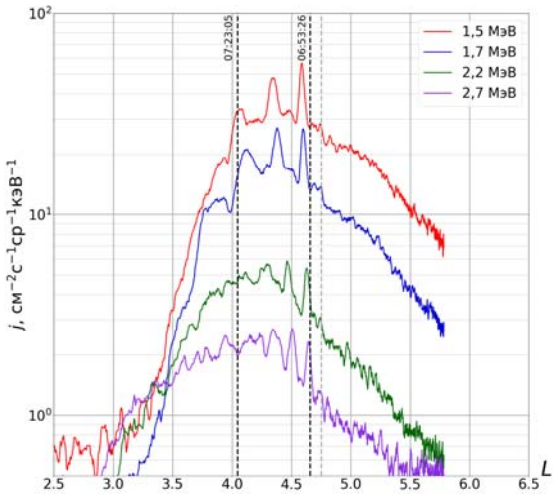

Рис. 3. Пространственно-временной профиль потоков электронов с энергией 1.5–2.7 МэВ по данным RBSP-A. Серая штриховая линия соответствует единовременному возрастанию потоков электронов, черные — первому и последнему возникшим пикам среди всех энергий

Возникло предположение, что зависимость периода повторного возникновения пиков может быть связана с периодом дрейфа вокруг Земли. Были проведены расчеты: для каждой энергии выделены три наиболее четких возрастания. определены соответственно два периода между ними, а затем проведено усреднение. Возникающие впоследствии пики имеют более размытую форму для больших энергий, либо находятся на спаде ВРПЗ, где могут искажаться из-за фона для меньших энергий.

Таким образом, электроны ускорились и затем, обходя Землю несколько раз, регистрировались на КА RBSP-A с периодом, равным дрейфовому периоду.

Ускорение электронов, скорее всего, связано с электрическим полем, но в начале этого события не было суббуревой активности, которая могла бы стать причиной появления индукционного электрического поля. Однако причиной его возникновения могло послужить то, что событие началось с резкого сжатия магнитосферы на $3R_E$.

ВЫВОДЫ

Сжатие магнитосферы привело к мгновенному возрастанию B_z-компоненты на орбитах ИСЗ GOES и КА Van Allen Probes (VAP-A и VAP-B) и к адиабатическим изменениям потоков электронов

На орбите GOES ($6.6R_E$) произошло падение потоков, на орбите КА Van Allen Probes (в области ~$4.7R_E$) — возрастание потоков энергичных электронов, что связано с положением КА относительно максимума ВРПЗ в области $(5\div6.6)R_E$.

Обнаружены повторяющиеся кратковременные возрастания потоков после начала события для

энергий электронов 1–2.7 МэВ на L≈4–5. Период повторения возрастаний потоков различен для каждой энергии.

Электроны при прохождении через область с электрическим полем ускорились и были зафиксированы VAP-A несколько раз повторно с периодом, совпадающим с теоретическим периодом дрейфа различным для каждой энергии. Эти пики в потоках электронов были зарегистрированы в течение всего 6-часового события на обоих КА VAP при каждом прохождении через область ~3.5–4.5 L.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Калегаев В., Власова Н., Пенг Ж. Динамика магнитосферы во время геомагнитных бурь 21 22. I. 2005 и 14 15. XII. 2006 г. // Космические исследования. 2015. Т. 53, № 2. С. 105–105.

Blake J. et al. Correlation of changes in the outer-zone relativistic-electron population with upstream solar wind and magnetic field measurements // Geophys. Res. Lett. 1997. T. 24, № 8. C. 927–929.

Foster J.C. et al. Shock-induced prompt relativistic electron acceleration in the inner magnetosphere // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2015. Vol. 120, No. 3. P. 1661–1674.

Paulikas G., Blake J. Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit // Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes. 1979. Vol. 21. P. 180–202.