

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.017

ПРОЯВЛЕНИЕ МЕЖПОЛУШАРНОЙ АСИММЕТРИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОТОКАХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЗАХВАЧЕННЫХ И ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ НА НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКАХ В СПОКОЙНЫХ И ВОЗМУЩЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Т.А. Яхнина, Т.А. Попова, А.А. Любчич, А.Г. Демехов

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

Аннотация. Высыпания релятивистских (>800 кэВ) электронов и потоки высыпающихся и захваченных энергичных (~ 100 кэВ) протонов чаще всего регистрируются во время геомагнитных возмущений, особенно, во время суббурь. При этом наблюдаются возмущения магнитного поля в субавроральной и авроральной областях ($50\text{--}75^\circ$ CGMLat). В результате развития ионно-циклотронной неустойчивости во внутренней магнитосфере происходит генерация электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн и питч-угловая диффузия протонов, что приводит к заполнению конуса потерь и, следовательно, к высыпанию энергичных протонов. ЭМИЦ волны, на поверхности Земли регистрируются как геомагнитные пульсации – квазипериодические колебания геомагнитного поля в диапазоне частот Pc1 (0,1–5 Гц). Одновременно на низкоорбитальных (~ 850 км) спутниках NOAA POES наблюдаются потоки заряженных энергичных высыпающихся и захваченных частиц. Эта работа посвящена изучению влияния ослабленного магнитного поля в районе Южно-Атлантической (Бразильской) магнитной аномалии на потоки энергичных протонов и релятивистских электронов в спокойных и возмущенных условиях.

Введение

Взаимодействие солнечного ветра и магнитосферы преимущественно происходит на высотах, где отличие магнитного поля Земли от дипольного пренебрежимо мало. На ионосферных высотах поле Земли значительно отличается от дипольного. Напряженность магнитного поля Земли в сопряженных точках в ионосфере, на широте 50° CGMLat может различаться в два раза [1, 2]. Одно и то же магнитосферное возмущение может вызвать два различных отклика в ионосфере в разных полушариях. Таким образом, анализ межполушарных различий потенциально может пролить свет на механизмы, участвующие во взаимодействии магнитосферы, ионосферы и термосферы, что было бы невозможно, если бы поле было симметричным.

Данные

Для измерения потоков высыпающихся и захваченных (с питч-углами 0° и 90° , соответственно) заряженных протонов с энергией $E = 115$ кэВ использованы данные спутников NOAA POES оснащенных детектором протонов и электронов средней энергии (Medium Energy Proton and Electron Detector, MEPEDE) [3]. Для наблюдения электронов с энергией ~ 1 МэВ использован канал протонного телескопа (P6), изначально предназначенный для регистрации протонов с энергиями $>6,9$ МэВ. Магнитометр Полярного геофизического института в обл. Ловозеро (GPS-координаты: N 67.9824° , E 35.05903°) на Кольском полуострове использовался для наблюдения за геомагнитными пульсациями в диапазоне 0,1–5 Гц. Магнитное поле, рассчитанное вблизи низкоорбитальных спутников, взято из данных NOAA (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

Результаты

Говоря об асимметрии магнитного поля в сопряженных точках, мы имеем в виду их положение согласно модели IGRF. Различия в напряженности поля означают, что высота зеркальных точек отражения захваченных заряженных частиц будет разной. Там, где поле слабое, высота зеркальных точек будет меньше, что позволяет предположить, что там больше частиц будет взаимодействовать с атмосферой. На рис. 1 представлено магнитное поле, рассчитанное для высоты 850 км в двух полушариях на всех долготах и на широтах $20\text{--}90^\circ$ в координатах AACGM (Altitude-Adjusted Corrected GeoMagnetic Coordinates). Расчеты проводились с использованием модели внутреннего поля Земли IGRF (International GeoMagnetic Reference Field) в программном комплексе GEOPACK-2008, разработанном Н.А. Цыганенко [4]. Наиболее слабое поле ($<2,5 \times 10^4$ нТл) наблюдается вблизи экватора на долготах от -120 до 120° AACGMLon, в северном полушарии – на широтах $20\text{--}40^\circ$ AACGMLat, в южном полушарии – от -20 до -65° AACGMLat. Это район Южно-Атлантической (Бразильской) магнитной аномалии, где магнитное поле составляет $(1,9\text{--}2,3) \times 10^4$ нТл. Для

сравнения: магнитное поле в субавроральных (60–70° AACGMlat) широтах на высоте 850 км достигает 4×10^4 нТл.

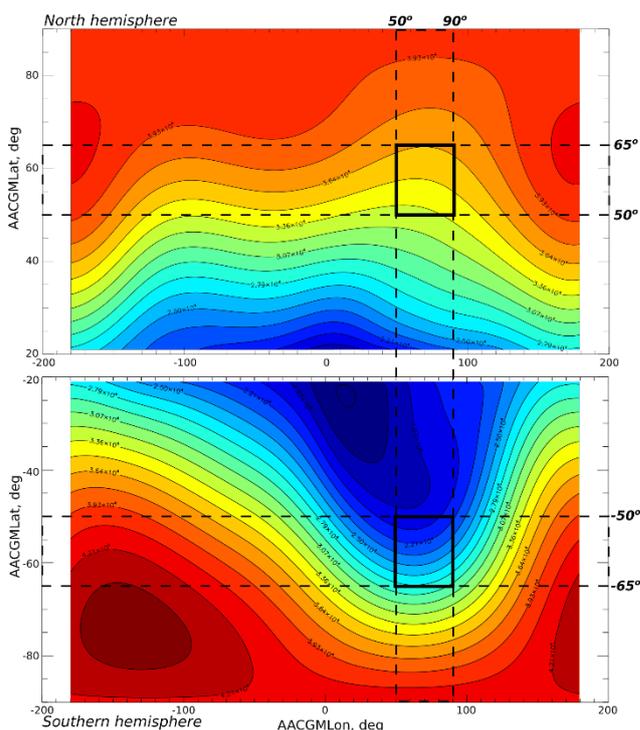


Рисунок 1. Рассчитанное внутреннее магнитное поле для 31 марта 2015 г.

Находясь на одних и тех же широтах и долготах в разных полушариях, низкоорбитальные спутники попадают в области с разной величиной магнитного поля. На рис. 1 черными сплошными линиями выделены области в разных полушариях, имеющие одинаковую долготу и широту. Величина магнитного поля в этих областях в северном полушарии составила $(3,3-3,6) \times 10^4$ нТл, а в южном $(2,0-2,8) \times 10^4$ нТл.

Чтобы определить влияние геомагнитных возмущений, мы выбрали две даты: 31 марта 2015 г. и 14 февраля 2017 г., соответственно для возмущенного и спокойного периодов. На рис. 2 видно, что 31 марта 2015 г. наблюдалась заметная суббуревая активность (AE~300 нТл), скорость солнечного ветра достигала 430 км/с, давление ~10 нПа. Для 14 февраля 2017 г., когда геомагнитные условия были спокойными (AE~50 нТл), скорость солнечного ветра составляла ~330 км/с, а давление ~2 нПа.

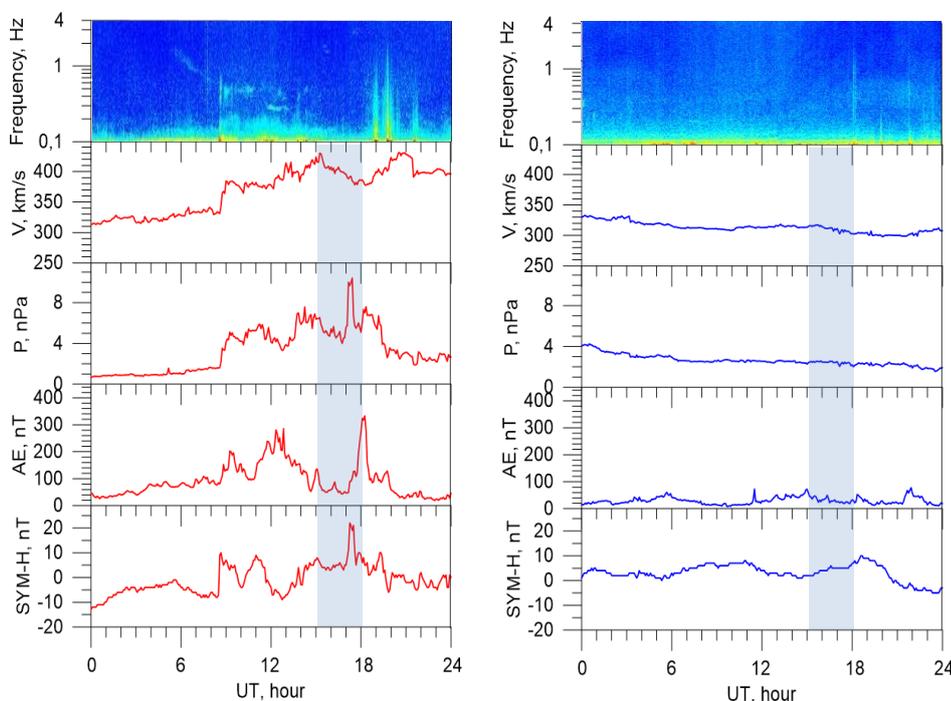


Рисунок 2. Для двух дат 31 марта 2015 г. (слева) и 14 февраля 2017 г. (справа) показаны параметры солнечного ветра (скорость (V) и давление (P)) и индексы геомагнитной активности (AE и SYM-H). На верхних панелях показаны спектрограммы геомагнитных пульсаций в обс. Ловозеро в диапазоне 0,1-4 Гц.

На спектрограммах obs. Ловозеро в первом событии одновременно с началом возмущения наблюдаются геомагнитные пульсации на частоте до 1 Гц. Во втором событии, как и ожидается при низкой геомагнитной активности, пульсации отсутствуют. На рисунках цветом выделены интервалы времени с 15 до 18 UT, когда на спутниках NOAA POES регистрировались потоки захваченных и высыпающих релятивистских электронов и энергичных протонов в сопряженных областях (рис. 3). Тесная связь между высыпанием энергичных протонов и геомагнитными пульсациями Pc1 диапазона установлена в ряде работ (например, [5]).

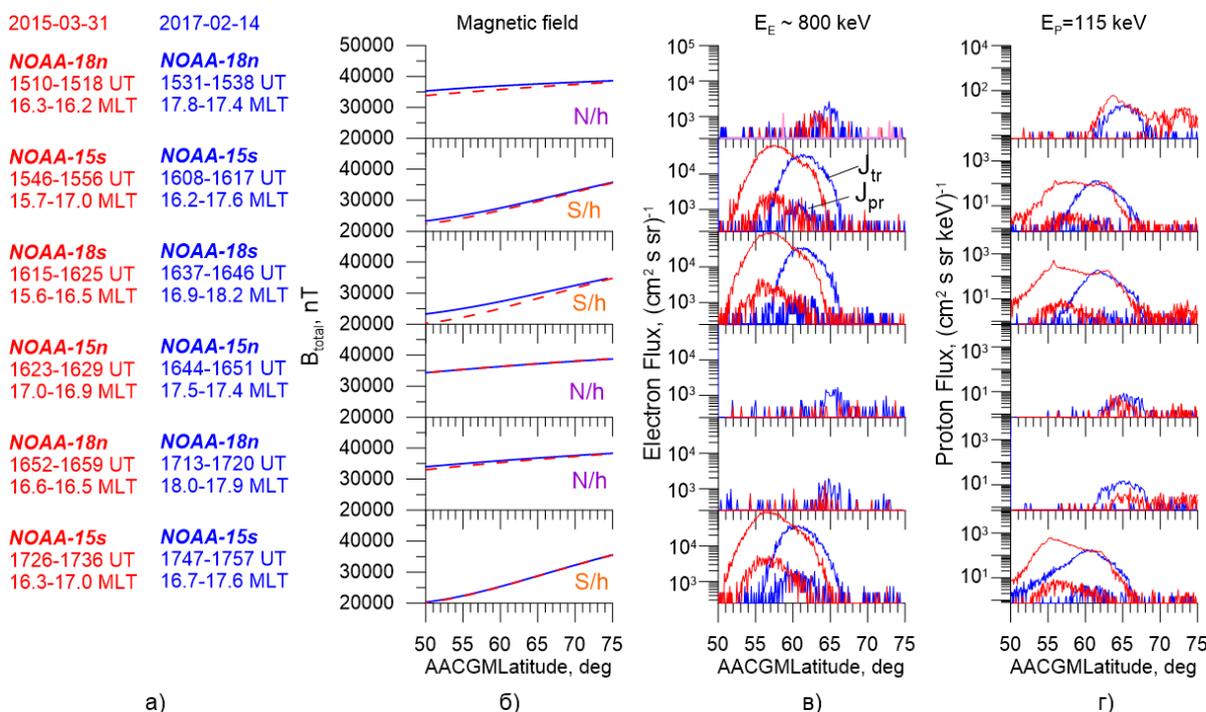


Рисунок 3.

- а) показано время UT и сектор MLT, когда спутники регистрировали потоки энергичных частиц на широтах 50–75° AACGM Lat 31 марта 2015 г. и 14 февраля 2017 г.
- б) – магнитное поле в окрестности спутников на широтах 50–75° AACGM Lat для 31 марта 2015 г. (пунктирная линия) и для 14 февраля 2017 г. (сплошная линия).
- в) – потоки захваченных и высыпающих релятивистских электронов для 31 марта 2015 г. (красные линии) и 14 февраля 2017 г. (синие линии).

Магнитное поле на рис. 3б практически одинаковое для обеих дат, поскольку спутники находятся в близких MLT секторах (см. рис. 3а). Однако величина и динамика магнитного поля отличается в разных полушариях. В северном полушарии поле варьируется в пределах $(3,4-3,8) \times 10^4$ нТл, в южном полушарии на низких широтах поле имеет минимальные значения около 2×10^4 нТл, на высоких – около $3,5 \times 10^4$ нТл. На рис. 3в и рис. 3г потоки захваченных и высыпающих частиц обозначены одним цветом, но разным цветом для каждой даты. Видно, что в северном полушарии потоки минимальные как в возмущенных, так и в спокойных условиях. В южном полушарии максимальные потоки как захваченных, так и высыпающих электронов и протонов выше при возмущенной активности и наблюдаются на меньших широтах. Для релятивистских электронов широта максимального потока в возмущенных условиях ($\sim 56^\circ$) и в спокойных ($\sim 61^\circ$) отличается на 5 градусов, а для энергичных протонов – на ~ 6 градусов. Различие в величине захваченных потоков в возмущенных и спокойных условиях в южном полушарии может достигать одного порядка. Область по широте, где регистрируются как потоки захваченных электронов, так и потоки захваченных протонов в южном полушарии в возмущенных условиях шире на 5–7 градусов, чем в спокойных. Увеличение области происходит, в основном, за счет низких широт, где магнитное поле заметно слабее. Для потоков захваченных протонов полярная граница при любой возмущенности находится на широте $\sim 68^\circ$. Для потоков захваченных релятивистских электронов во время магнитных возмущений полярная граница находится на широте $\sim 65^\circ$, в спокойных условиях – на широте $\sim 67^\circ$. Что касается потоков высыпающих электронов и протонов, то их уровень также выше во время геомагнитных возмущений.

Выводы

Различия в напряженности поля в сопряженных полушариях приводят к разным ионосферным проявлениям магнитосферных возмущений. Энергичные заряженные частицы, дрейфующие в магнитосфере, попадают в увеличенный конус потерь в области ослабленного поля (дрейфовый конус потерь) и высыпаются в ионосферу. Такие высыпания, обусловленные взаимодействием с ОНЧ излучением от молниевых разрядов, изучались в [6].

В данной работе рассмотрено влияние межполушарной асимметрии на величину потоков заряженных захваченных и высыпающихся релятивистских электронов и энергичных протонов для двух случаев. Показано, что:

- На величину потоков основное влияние оказывает напряженность магнитного поля. Поэтому в южном полушарии, где магнитное поле меньше, наблюдаются большие потоки частиц.
- Сравнение потоков в южном полушарии в возмущенных и спокойных условиях показало, что геомагнитные возмущения также способствуют увеличению потоков.
- Широтный размер области наблюдения потоков также максимален в южном полушарии. В спокойных условиях для захваченных частиц он составляет 10 градусов, в возмущенных – 15 градусов. Пропорционально ведут себя потоки высыпающихся частиц. Увеличение области происходит, в основном, за счет низких широт.

Благодарности

Эта работа поддержана Российским научным фондом, грант № 22-62-00048. Авторы благодарят сотрудников Полярного геофизического института, обеспечивающих наблюдения геомагнитных пульсаций. Авторы благодарят за свободный доступ к данным спутников NOAA POES и информации о параметрах солнечного ветра, об индексах активности AE и SYM-H из базы данных OMNI, полученных на сайте <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>.

Литература

1. Laundal K.M., I. Cnossen, S.E. Milan, S.E. Haaland, J. Coxon, N.M. Pedatella, M. Förster, J.P. Reistad. North–South Asymmetries in Earth’s Magnetic Field // *Space Sci. Rev.*, V.206, P.225–257, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0273-0>
2. Любчик А.А., Т.А. Попова, Т.А. Яхнина, А.Г. Демехов. Асимметрия магнитного поля Земли в двух полушариях // *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XLVI Annual Seminar*. 2023. P.69–73. DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.015
3. Evans D.S., M.S. Greer. Polar orbiting environmental satellite space environment monitor-2: Instrument descriptions and archive data documentation // NOAA Tech. Memo 1.4, Boulder, Colorado: NOAA OARL Space Environment Center, 2004.
4. <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/Geopack-2008.html>
5. Яхнина Т.А., А.Г. Яхнин, Й. Кангас, Ю. Маннинен. Локализованные увеличения потоков энергичных протонов на низких высотах в субавроральной области и их связь с пульсациями Pc1 // *Космические исследования*, Т.40, №3, С.230–241, 2002. (Yahnina T.A., A.G. Yahnin, J. Kangas, J. Manninen, Localized enhancements of energetic proton fluxes at low altitudes in the subauroral region and their relation to the Pc1 pulsations // *Cosmic Research*, V.40, No. 3, P.213–223, 2002.)
6. Blake J.B., U.S. Inan, M. Walt, T.F. Bell, J. Bortnik, D.L. Chenette, H.J. Christian. Lightning-induced energetic electron flux enhancements in the drift loss cone // *J. Geophys. Res.* V.106, No.A12. P.29733–29744, 2001. <https://doi.org/10.1029/2001JA000067>