

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.015

ЛОКАЛИЗАЦИЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДИАПАЗОНА Pc1 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ СОБЫТИЯ 20 ИЮНЯ 2013 ГОДА

Т.А. Яхнина¹, А.Г. Демехов¹, А.А. Любчик¹, Ю.В. Федоренко¹, Е.Н. Ермакова²

¹ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

²Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация

В данной работе определена локализация магнитосферных источников геомагнитных пульсаций Pc1 диапазона (0,2÷5,0 Гц), наблюдаемых 20 июня 2013 г. Рассматриваемое событие состояло из пульсаций IPDP и Pc1. Пульсации IPDP были очень продолжительными, они наблюдались в интервале 16-21 UT, и сразу после них в 21-23 UT регистрировались пульсации Pc1. Пульсации наблюдались на наземных станциях «Ловозеро» (L=5,41) и «Новая жизнь» (L=2,67). Локализация магнитосферных источников определялась по данным низкоорбитальных спутников серии POES (NOAA, MetOp), регистрирующих локализованные высыпания энергичных (> 30 кэВ) протонов и электронов. Как IPDP, так и Pc1 сопровождалась высыпаниями релятивистских (~800 кэВ) электронов. Определены геомагнитные условия и параметры солнечного ветра до и во время наблюдения пульсаций.

Введение

Считается, что геомагнитные пульсации в диапазоне Pc1 (электромагнитные ионно-циклотронные (ЭМИЦ) волны) являются результатом развития ионно-циклотронной (ИЦ) неустойчивости вблизи экваториальной плоскости. Ионно-циклотронное взаимодействие предполагает, как генерацию ЭМИЦ волн, так и рассеяние протонов кольцевого тока по питч-углам (например, [Cornwall et al., 1970]), которое приводит к заполнению конуса потерь [Erlandson and Ukhorsky, 2001; Yahnin and Yahnina, 2007] и, соответственно, высыпанию протонов. Наилучшая корреляция между локализованными высыпаниями протонов и пульсациями наблюдалась, когда высыпания фиксировались вблизи (в пределах двух часов магнитного местного времени, MLT) меридиана наземной станции, на которой регистрировались пульсации. Поэтому можно считать, что локализованные высыпания энергичных протонов являются ионосферной проекцией области развития ИЦ неустойчивости в экваториальной магнитосфере [Yahnin and Yahnina, 2007]. Ионно-циклотронная неустойчивость приводит к высыпанию не только протонов с энергиями 10–100 кэВ, но и релятивистских электронов [Sandanger et al., 2007], обеспечивая потери, как частиц кольцевого тока, так и внешнего радиационного пояса. Это объясняет интерес к определению областей развития ИЦ неустойчивости в магнитосфере и их динамики в различных геофизических условиях. Использование нескольких низкоорбитальных спутников серии POES с полярными круговыми орбитами на высоте около 800 км обеспечивают хороший мониторинг ближней магнитосферы. В предыдущих работах мы всегда имели дело с сильной питч-угловой диффузией, когда конус потерь был заполнен и регистрировались потоки как высыпающихся, так и захваченных на высоте спутника протонов. В этой работе будет рассмотрена связь слабой питч-угловой диффузии в конус потерь с генерацией пульсаций Pc1, их частотой и интенсивностью.

Наблюдения и результаты

В наземных обсерваториях Ловозеро (LOZ, 68,01°N, 35,30°E; L=5,41) и Новая Жизнь (NL, 56,00 N, 45,74 E; L=2,67) 20 июня 2013 г. в 16-21 UT наблюдались очень продолжительные пульсации IPDP с частотами от 0,3 до 1,5 Гц (рис. 1). После IPDP в 21-23 UT наблюдались пульсации Pc1 с достаточно высокой частотой 2,5-4,0 Гц. Геомагнитные пульсации наблюдались после серии суббурь, регистрируемых в течение нескольких дней. Наблюдению пульсаций предшествовали три магнитосферных поджатия с интенсивностью 6, 12 и 9 нПа, которые имели место 20 июня в 00 UT, 07 UT и 19:45 UT (третье поджатие произошло во время IPDP). После третьего поджатия скорость солнечного ветра увеличилась до 490 км/сек. Электрическое поле во время IPDP было изменчивым: то возрастало до +4 мВ/м, то уменьшалось до -2 мВ/м, а во время Pc1 после 21:30 UT все время возрастало от -2 мВ/м до +3 мВ/м (рис. 2).

Все низкоорбитальные спутники серии POES (NOAA, MetOp) оснащены однотипными детекторами MERED, измеряющими потоки заряженных частиц с энергией $E > 30$ кэВ и TED для измерения потоков частиц с энергией < 20 кэВ [Evans et al., 2000]. Во время IPDP одновременно с высыпаниями энергичных протонов регистрировались и высыпания менее энергичных (< 20 кэВ) протонов. При этом протонные высыпания смещались к экватору с 63 до 61 CGMLat. Согласно работе [Yahnina et al., 2003] такие высыпания наблюдаются, в основном, в вечернем секторе и обусловлены взаимодействием с ЭМИЦ волнами дрейфующих на запад протонов на внешней границе плазмосферного «хвоста».

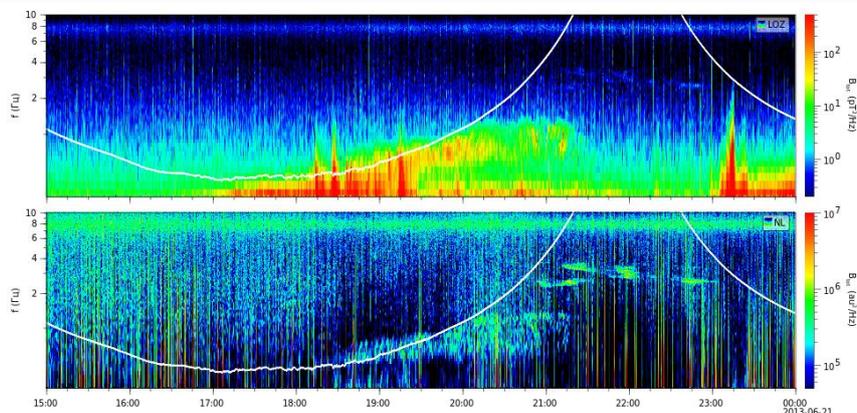


Рисунок 1. Спектрограммы геомагнитных пульсаций, регистрируемых в obs. Ловозеро (вверху) и в obs. Новая Жизнь (внизу).

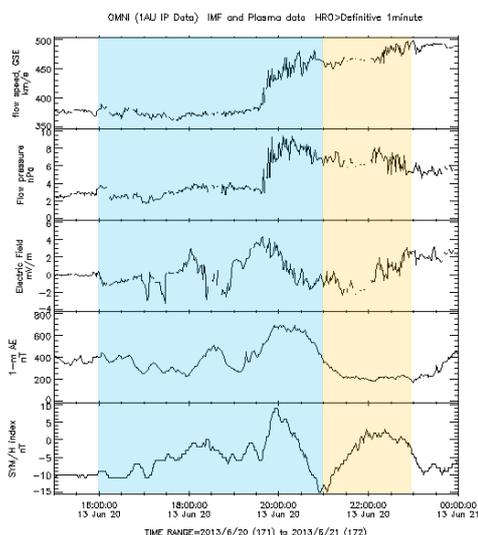


Рисунок 2. Индексы SYM-H, AE и параметры солнечного ветра: скорость солнечного ветра, давление и электрическое поле. Пульсации IPDP наблюдались во время интервала, отмеченного голубым цветом. Пульсации Pc1 – желтым цветом.

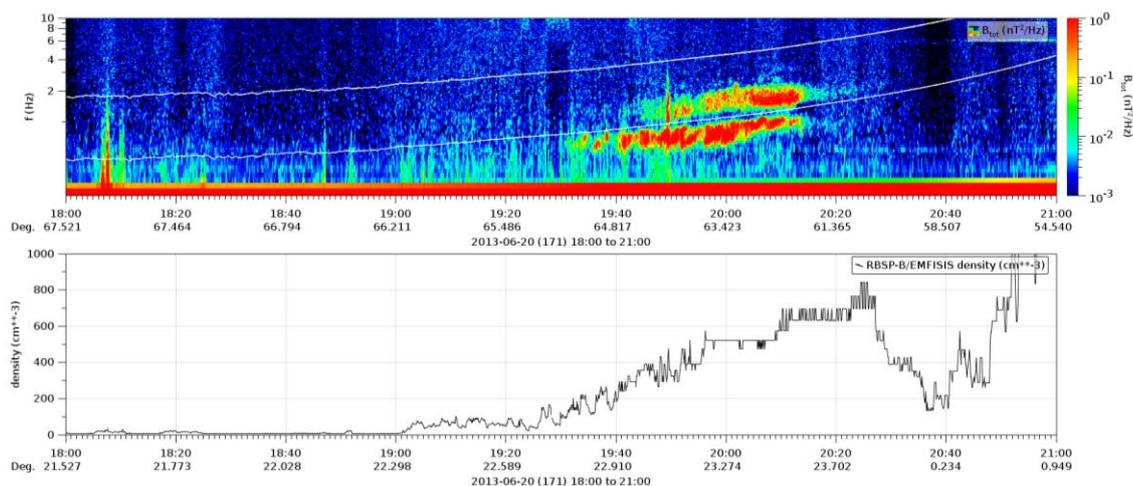
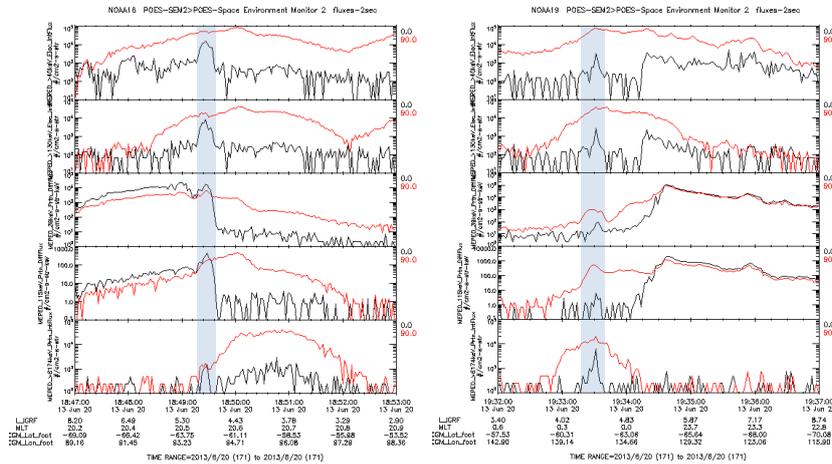


Рисунок 3. Наблюдаемые на спутнике RBSP-B ЭМИЦ волны и измеренная плотность плазмы.

Действительно, на сопряженном со станцией спутнике RBSP-B во время IPDP в 19:30 – 20:15 UT регистрировались ЭМИЦ волны на таких же инвариантных широтах 61,5-65,0 CGMLat, как и протонные высыпания на спутниках POES. Спутник RBSP-B в это же время регистрировал значительное увеличение

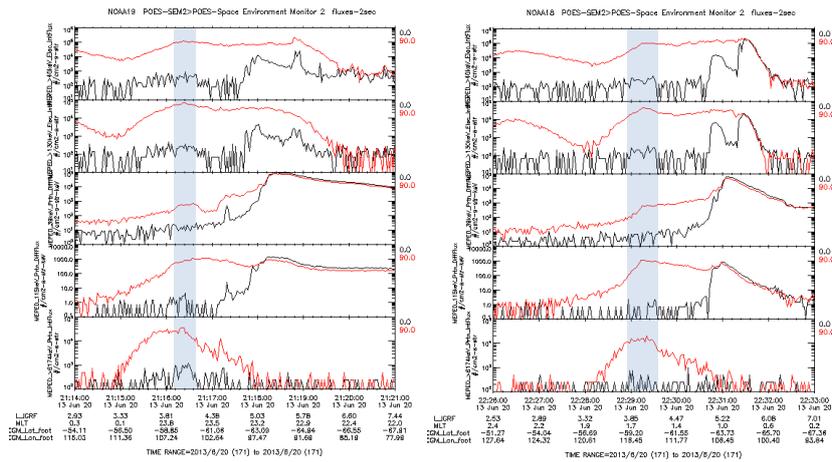
плотности холодной плазмы до 800 см^{-3} , что соответствует его входу в плазмосферу (рис. 3). Инкремент ЭМИЦ волн был рассчитан с использованием функции распределения энергичных протонов, измеренной спутником RBSB-B. Эти вычисления (не приведены для краткости) продемонстрировали увеличение инкремента в частотно-временной области, которое хорошо соответствует наблюдаемым ЭМИЦ волнам. Этот факт позволяет предположить, что RBSP-B пересек область генерации IPDP во время наблюдения ЭМИЦ волн.

Высыпания энергичных частиц, зарегистрированные на спутниках серии POES во время пульсаций IPDP, показаны на рис. 4, во время пульсаций Pc1 — на рис. 5. Серым цветом отмечены локализованные высыпания.



E1>30 keV
E2>100 keV
P1=30-80 keV
P2=80-250 keV
P6(REP)>800 keV

Рисунок 4.



E1>30 keV
E2>100 keV
P1=30-80 keV
P2=80-250 keV
P6(REP)>800 keV

Рисунок 5.

Сравнение экваториальных гирочастот ионов гелия f_{He+} и водорода f_{H+} , оцененных по инвариантной широте предполагаемых источников волн, с частотами пульсаций показало, что пульсации IPDP принадлежат гелиевой полосе ($f < f_{He+}$) в области ее генерации, а более высокочастотные Pc1 генерируются в водородной полосе частот ($f_{He+} < f < f_{H+}$) (рис. 6).

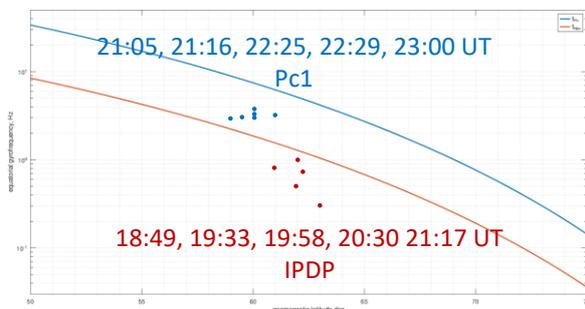


Рисунок 6. В указанные моменты времени наблюдались локализованные протонные высыпания во время пульсаций IPDP и локализованные усиления в потоках захваченных протонов во время пульсаций Pc1.

Результаты и обсуждение

Пульсации IPDP и Pc1 наблюдаются после суббуревой инжекции энергичных протонов в ночном секторе.

Увеличение частоты пульсаций IPDP связано со смещением к экватору протонных высыпаний. Во время IPDP были обнаружены локализованные высыпания энергичных протонов в диапазонах энергий 30-80 кэВ и <20 кэВ, что указывает на возможные магнитосферные источники этих пульсаций.

По данным спутника RBSB-B о функции распределения энергичных протонов был вычислен инкремент ЭМИЦ волн. Результаты показывают увеличение инкремента в частотно-временной области, которое хорошо соответствует наблюдаемым ЭМИЦ волнам.

Положение источников высокочастотных пульсаций Pc1 определялось только по локальным усилениям в потоках захваченных протонов. Такие усиления указывают на наличие слабой питч-угловой диффузии, недостаточной для того, чтобы вызвать высыпание частиц (т.е. заметные потоки в конусе потерь).

Показано, что пульсации IPDP принадлежат гелиевой полосе ($f < f_{\text{He}^+}$) в области их генерации, а более высокочастотные пульсации Pc1 - водородной полосе ($f_{\text{He}^+} < f < f_{\text{H}^+}$).

Высыпания релятивистских электронов наблюдались одновременно с локальными усилениями в потоках захваченных и высыпающихся протонов, которые маркируют область источника пульсаций IPDP и одновременно с локальными усилениями в потоках только захваченных протонов, которые маркируют область источника пульсаций Pc1.

Во время наблюдения пульсаций Pc1 на частотах 2,5-4,0 Гц наблюдаются лишь усиления в потоках захваченных протонов, что соответствует слабой питч-угловой диффузии частиц в конус потерь. Пульсации имеют малую интенсивность. По-видимому, это связано с генерацией пульсаций в водородной (протонной) полосе частот. Сложность обнаружения ЭМИЦ волн этого диапазона на Земле может быть связана с меньшей мощностью или неблагоприятными условиями распространения, а именно, необходимостью преодолеть область циклотронного резонанса с ионами He⁺ [Engelbreton *et al.*, 2008; Usanova *et al.*, 2008]. Увеличение частоты IPDP сопровождалось сдвигом широт локализованных высыпаний протонов к экватору. Это говорит в пользу механизма формирования пульсаций IPDP (ЭМИЦ волн), связанного с дрейфом энергичных протонов внутри плазмосферы.

Выводы

Определена магнитосферная локализация источников геомагнитных пульсаций Pc1 и IPDP.

Пульсации наблюдались после продолжительной суббуравной активности и трех поджатий магнитосферы, в результате которых наблюдалась инжекция энергичных протонов в ночном секторе.

Высыпания релятивистских электронов наблюдались одновременно с локализованными потоками высыпающихся протонов во время пульсаций IPDP и с локализованными потоками захваченных протонов во время пульсаций Pc1, которые маркируют область источника ЭМИЦ волн.

Благодарности. Работа Т.А. Яхниной, А.Г. Демехова, А.А. Любича поддержана грантом РФФ № 22-62-00048.

Литература

- Cornwall J.M., Coroniti F.V., Thorne R.M. Turbulent Loss of Ring Current Protons // *J. Geophys. Res.* V. 75(25). P. 4699–4709. 1970.
- Engelbreton M.J., Lessard M.R., Bortnik J., Green J.C., Horne R.B., Detrick D.L., Weatherwax A.T., Manninen J., Petit N.J., Posch J.L., Rose M.C. Pc1–Pc2 waves and energetic particle precipitation during and after magnetic storms: Superposed epoch analysis and case studies // *J. Geophys. Res.* V. 113. A01211. doi:10.1029/2007JA012362. 2008.
- Erlanson R.E., Ukhorskiy A.J. Observations of electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms: Wave occurrence and pitch angle scattering // *J. Geophys. Res.* V. 106. P. 3883–3895. doi:10.1029/2000JA000083. 2001.
- Evans D.S., Greer M.S. Polar orbiting environmental satellite space environment monitor. 2: Instrument descriptions and archive data documentation // NOAA Technical Memorandum OAR SEC93. Boulder, 2000.
- Sandanger M., Søråas F., Aarsnes K. et al. Loss of relativistic electrons: Evidence for pitch angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves excited by unstable ring current protons // *J. Geophys. Res.* V. 112. A12213. doi:10.1029/2006JA012138. 2007.
- Usanova M.E., Mann I.R., Rae I.J., Kale Z.C., Angelopoulos V., Bonnell J.W., Glassmeier K.-H., Auster H.U., Singer H.J. Multipoint observations of magnetospheric compression-related EMIC Pc1 waves by THEMIS and CARISMA // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. L17S25. doi:10.1029/2008GL034458. 2008.
- Yahnin A.G., Yahnina T.A. Energetic proton precipitation related to ioncyclotron waves // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 69. P. 1690–1706. doi:10.1016/j.jastp.2007.02.010. 2007.
- Yahnina T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J., Evans D.S., Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Yu., Thomsen M.F., Reeves G.D., Gvozdevsky B.B. Energetic particle counterparts for geomagnetic pulsations of Pc1 and IPDP types // *Ann. Geophysicae* V. 21(12). P. 2281–2292. 2003.