

ПОЛОИДАЛЬНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ $Pc5$ ПУЛЬСАЦИИ И ПУЛЬСАЦИИ В ПОТОКАХ ЧАСТИЦ

В.Б. Белаховский¹, В.А. Пилипенко², С.Н. Самсонов³, Д.Ю. Климушкин⁴, П.А. Магер⁴

¹Полярный Геофизический Институт, Апатиты

²Институт физики Земли, Москва

³Институт космофизических исследований, Якутск

⁴Институт солнечно-земной физики, Иркутск

Аннотация. Проанализирован случай синхронных наблюдений типичных полоидальных геомагнитных $Pc5$ пульсаций 9 Мая 2003 года с помощью магнитометра на спутнике GOES-10, детектора частиц на LANL-91 и на наземных магнитных и риометрических станциях. Показано, что полоидальные геомагнитные $Pc5$ колебания на геостационарной орбите модулируют потоки энергичных электронов и протонов с $E=50-75$ кэВ. Также обнаружено, что полоидальные геомагнитные $Pc5$ колебания сопровождаются соответствующими $Pc5$ пульсациями в риометрическом поглощении на сопряженной станции на той же частоте. Обсуждаются нерешенные вопросы взаимодействия УНЧ волн и энергичных частиц, которые возникают в ходе анализа данного события.

Введение: Полоидальные $Pc5$ пульсации геомагнитного поля и потоков частиц

Полоидальные пульсации $Pc5$ представляют собой альфвеновские волны, в которых колебания силовых линий происходят в основном в радиальном направлении. Необходимым условием для этого является мелкомасштабность в азимутальном направлении, что соответствует большим значениям азимутальных волновых чисел ($m = 20-150$) и азимутальным длинам волн 1000-10000 км (в проекции на геостационарную орбиту). Вследствие своей поперечной мелкомасштабности эти пульсации экранируются ионосферой и практически не могут наблюдаться на наземных магнитометрах. Вместе с тем, они активно изучаются с помощью спутников [Меликян и др., 2012] и радаров.

В ряде случаев полоидальные пульсации $Pc5$ обладают также продольной компонентой магнитного поля волны, т.е. приводят к колебаниям модуля магнитного поля волны. В этих случаях эти волны называют также компрессионными. В связи с тем, что компрессионные пульсации $Pc5$ наблюдаются, как правило, на фазе восстановления магнитных бурь, их также называют буревыми (*storm-time*) пульсациями [Barfield and McPherron, 1972]. Наличие компрессионной компоненты этих пульсаций объясняется тем, что в плазме конечного давления в кривом магнитном поле полоидальная альфвеновская мода сцеплена с компрессионной модой.

В настоящее время является общепринятым, что возбуждение буревых пульсаций $Pc5$ связано с потоками протонов кольцевого тока. Полоидальные $Pc5$ пульсации в основном локализованы в вечернем и дневном секторах магнитосферы, где наблюдается максимум кольцевого тока. Наиболее распространено мнение, что полоидальные пульсации $Pc5$ возбуждаются в результате спонтанной генерации за счет неустойчивости связанной альфвеновской и компрессионной моды в неравновесной плазме. Источником свободной энергии для роста плазменных неустойчивостей могут быть либо резкие неоднородности плотности энергичных протонов кольцевого тока (дрейфовая неустойчивость), либо немонотонность распределения частиц по энергиям, образующаяся в результате дрейфа инжектированных протонов (bump-on-tail неустойчивость).

По данным геостационарных спутников было известно, что полоидальные $Pc5$ пульсации сопровождаются соответствующими пульсациями в потоках захваченных электронов и протонов. В то время как тороидальные (с малыми m) геомагнитные $Pc5$ пульсации, сопровождаются соответствующими пульсациями в риометрическом поглощении, вопрос о связи полоидальных $Pc5$ пульсаций с пульсациями в риометрическом поглощении не был исследован.

В данной работе рассмотрен случай наблюдения типичных полоидальных геомагнитных $Pc5$ пульсаций 9 Мая 2003 года. Используются трехкомпонентные данные измерений с разрешением 1 мин магнитного поля на геостационарном спутнике GOES-10 (LT=UT-9.6). Динамика энергичных частиц в магнитосфере отслеживалась с помощью детекторов электронов и протонов с энергией 50-75 кэВ на геостационарном спутнике LANL-1991 (LT=UT-10.3), который располагается примерно в 1 часе MLT от GOES-10. Наблюдение за наземным магнитным полем осуществлялось с помощью станций сети CARISMA. Контроль за потоками высыпавшихся в ионосферу частиц осуществлялся с помощью риометров сети NORSTAR. Станция McMurray (MCM, полдень 2010 UT) с магнитометром и риометром находится вблизи проекции силовой линии, проходящей через спутник GOES-10.

Событие 9 Мая 2003

В период 10.00-23.00 UT 09.05.2003 произошла умеренная магнитная буря (SYM-H~50 нТл) с длительной фазой восстановления (рис. 1). На утренней стороне магнитосферы наблюдался повышенный нерегулярный уровень выпадения электронов. Магнитосферное магнитное поле релаксировало после 13.30 UT к дипольному. На LANL-91 в 1230 UT зарегистрирована мощная инжекция энергичных электронов, не вызвавшая отклик в УНЧ пульсациях. Pc5 колебания на GOES-10 начались уже на фоне того, что потоки протонов релаксировали к до-возмущенному уровню, в 1830 UT. Резкое начало геомагнитных Pc5 пульсаций в магнитосфере совпадает с небольшим увеличением потоков протонов, которое было зарегистрировано на спутнике LANL-1991 в канале 50-75 кэВ.

Более детальное рассмотрение колебаний в интервале 18.00-23.00 UT (рис. 2) показывает, что на GOES-10 наиболее интенсивные Pc5 пульсации наблюдались в модуле *ht* магнитного поля ~20 нТл, амплитуда пульсаций в радиальной *he* компоненте ~10 нТл заметно превышает амплитуду пульсаций в азимутальной *hn*-компоненте ~5 нТл.

Пульсации магнитного поля в магнитосфере сопровождалась пульсациями потоков энергичных электронов и протонов. Однако спектральный состав этих пульсаций зачастую отличался друг от друга, что видно даже при визуальном анализе. Для некоторых временных интервалов частота вариаций магнитного поля на геостационарной орбите ($f \approx 1.7$ мГц) примерно совпадает с частотой вариаций потоков энергичных электронов на LANL-1991 и с частотой вариаций в риометрическом поглощении. Однако, есть интервалы (например, 20.10-21.30 UT), когда такого совпадения не наблюдается.

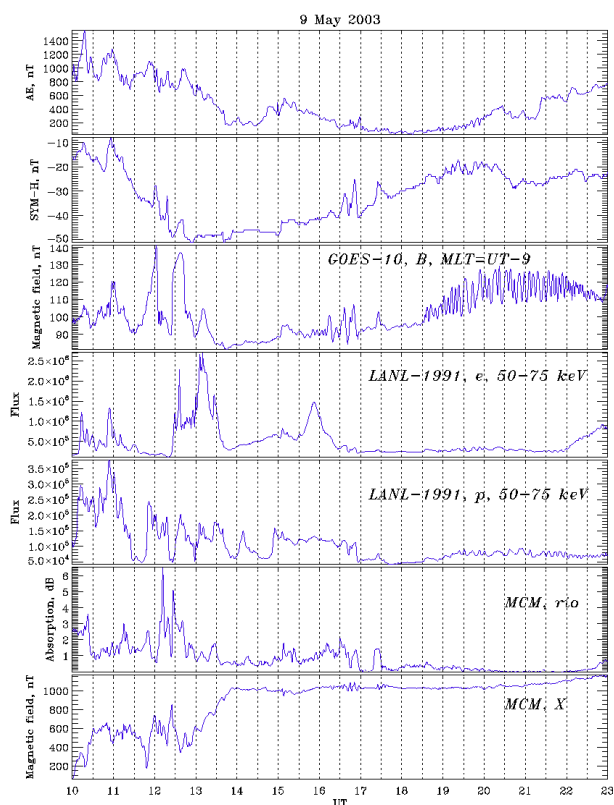


Рис. 1. AE, SYM-H – индексы. Модуль магнитного поля на спутнике GOES-10. Потоки электронов и протонов с энергией 50-75 кэВ на спутнике LANL-1991. Риометрическое поглощение, магнитное поле на станции MCM.

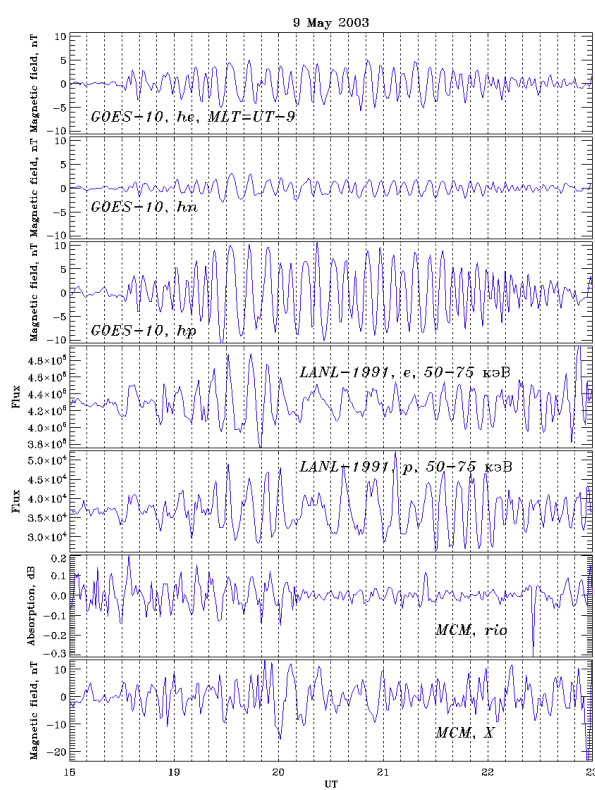


Рис. 2. Вариации с удаленным низкочастотным трендом магнитного поля на GOES-10 (*he*, *hn*, *hp*-компоненты), потоков электронов и протонов с $E=50-75$ кэВ на LANL-1991, риометрического поглощения и магнитного поля на станции MCM.

Геомагнитные Pc5 пульсации также сопровождалась соответствующими Pc5 пульсациями в потоках протонов $E=50-75$ кэВ на спутнике LANL-1991. При этом Pc5 пульсации в потоках протонов и электронов на спутнике LANL-1991 находятся между собой в фазе, а пульсации в потоках протонов и в модуле магнитного поля на спутнике GOES-10 находятся в противофазе. Противофазность вариаций поля и давления плазмы является характерным свойством альвеновских колебаний в горячей плазме.

Волновая активность Pc5 диапазона в магнитосфере сопровождалась иррегулярными пульсациями того же диапазона в риометрическом поглощении на сопряженной станции MCM. Однако эти пульсации были менее четко выраженными, чем пульсации в потоках частиц.

На сопряженной наземной магнитной станции гармонических пульсаций того же типа, что на спутнике, практически не видно. Спектральные максимумы вариаций магнитного поля на GOES-10 и на Земле (на станции MCM) не совпадают. Поэтому надежное определение азимутальных волновых чисел m и направления распространения Pc5 пульсаций по наземным данным невозможно. Из спутниковых данных это тоже оказывается затруднительным, так как ближайший геостационарный спутник с магнитометром на борту GOES-8 находится в 4 часах MLT от GOES-10, на котором рассматриваемые Pc5 пульсации уже практически не видны.

Обсуждение результатов

Таким образом, полоидальные геомагнитные Pc5 пульсации на геостационарной орбите могут сопровождаться соответствующими Pc5 пульсациями в риометрическом поглощении на сопряженной станции. Также наблюдаются соответствующие Pc5 пульсации в потоках энергичных электронов с E=50-75 кэВ в районе геостационарной орбиты. Однако такая связь неоднозначна. Хотя для некоторых временных интервалов наблюдается совпадение спектральных максимумов в модуле магнитного поля на GOES-10, в риометрическом поглощении на MCM, и в потоках энергичных электронов на LANL-1991, зачастую отклик в потоках захваченных и высыпающихся частиц на интенсивные квази-монохроматические полоидальные геомагнитные Pc5 пульсации виден слабо (рис. 2). Причина такой неоднозначности нам не ясна.

То, что возбуждение буревых Pc5 пульсаций связано с потоками протонов кольцевого тока, сомнения не вызывает. Однако в проанализированном событии неоднократные интенсивные инъекции протонов на главной фазе бури не приводили к возбуждению длительных серий Pc5 колебаний. Только на фазе восстановления, при меньших в несколько раз интенсивностях кольцевого тока, наблюдалось возбуждение этих колебаний. При этом Pc5 пульсации в магнитосфере не плавно нарастали от фонового уровня, а возникали достаточно резко. Исходя из этого, можно предположить, что механизм их возбуждения не просто вызван раскачкой кинетической неустойчивости, приводящей к росту возмущений от уровня фоновых флуктуаций до уровня нелинейного насыщения, как это обычно предполагается, а с триггерным возбуждением (подобным вскипанию переохлажденной жидкости). Таким триггером могла быть инъекция частиц, хотя и небольшой интенсивности. Можно предположить, что в ходе развития бури магнитосферная плазма перешла в состояние, близкое к неравновесному. Последовавшая инъекция частиц сгенерировало начальную волну с амплитудой, существенно превосходящую флуктуацию фонового уровня [Mager и Klimushkin, 2007]. Распространяясь по магнитосфере, это начальное возмущение было впоследствии усилено в результате неустойчивости протонов кольцевого тока.

Таким образом, возбуждение частицами квазимонохроматических колебаний диапазона Pc5 наиболее характерно для восстановительной фазы магнитной бури, когда неравновесные распределения горячих протонов медленно релаксируют к термодинамически устойчивому состоянию. Т.о. помимо драйвера (кольцевого тока), должна сформироваться и резонансная система для поддержания высокочастотных колебаний. Волновая энергия ограничена в таком резонаторе не только между сопряженными ионосферами, но и поперек магнитных оболочек. Теоретические указания на возможность существования такого резонатора в районе кольцевого тока содержатся в [Klimushkin, 1998], однако доказательств и условий его формирования не получено.

Величина азимутального числа m , которую можно косвенно оценить по степени прохождения пульсаций к земной поверхности, и поляризации поперечных компонент, меняется от события к событию. Что является фактором, выделяющим определенную величину m , остается неясным. Если раскачка неустойчивости вызвана резонансным взаимодействием волны с дрейфующими ионами кольцевого тока, то должно выполняться условие баунс-дрейфового резонанса $\omega - m\omega_d = n\omega_b$, где ω_d – дрейфовая частота ионов, ω_b – баунс-частота частиц, ω – частота волны, n – номер гармоники баунс-движения. Однако протоны кольцевого тока имеют большой тепловой разброс по энергиям и питч-углам, в связи с чем резонансное условие может выполняться для достаточно широкого интервала значений m [Mager and Klimushkin, 2005].

Вариации потоков частиц, вызванные взаимодействием с УНЧ волнами, представляют собой достаточно сложный процесс. При таком взаимодействии может происходить как генерация волн потоками частиц, так модуляция потоков УНЧ волной. В периодические вариации функции распределения частиц вносят сопоставимый вклад радиальное смещение силовой трубки, локальное ускорение частиц, изменение пробочного отношения [Southwood and Kivelson, 1981; Kivelson and Southwood, 1985]. Глубина модуляции функции распределения зависит от многих условий и параметров: вида невозмущенной функции распределения по энергиям и питч-углу, продольной структуры волны вдоль силовой линии, типа МГД волны, энергии и питч-угла частиц, положения спутника относительно вершины силовой линии, соотношения между частотой волны и частотами баунс-осцилляций и магнитного дрейфа. При измерениях

интегральных потоков, например спутниковыми всенаправленными детекторами или риометрами, эффекты модуляции могут в значительной мере усредняться. Кроме того, характерный масштаб в ионосфере, соответствующей длине волны полюидальных Pc5 пульсаций в магнитосфере составляет $\Delta y \sim k_y^{-1} = R_E \cos \Phi / m$, что для $m > 20$ становится $< 10^2$ км, т.е. меньше поля зрения однолучевого вертикального риометра. В результате, ионосферные эффекты таких мелкомасштабных модулированных потоков могут в значительной мере усредниться. К сожалению, вблизи проекции силовой линии, проходящей через геостационарный спутник GOES-10, находился обычный вертикальный риометр. Многопестковый риометр (IRIS), позволил бы исследовать Pc5 пульсации в риометрическом поглощении более детально, поскольку обладает лучшим пространственным разрешением.

МГД волны Pc5 диапазона не могут нарушить адиабатичность движения захваченных частиц и вызвать их высыпание в конус потерь. Для этого, например, нужно комбинированное действие ОНЧ шумов, вызывающих рассеяние захваченных частиц по питч-углам, и модуляция инкремента раскачки ОНЧ шумов МГД волной [Coroniti and Kennel, 1970]. Проверить это не так просто, т.к. энергичные электроны, способные вызывать изменения поглощения космических радиосумов в ионосфере, доходят до вечерней стороны, где преимущественно наблюдаются буревые Pc5 пульсации, сильно ослабленными.

Таким образом, простые представления о модуляции потоков частиц МГД волной не могут объяснить наблюдаемые особенности взаимодействия полюидальных альфвеновских волн и потоков захваченных и высыпающихся электронов/протонов: спорадичность периодического отклика потоков частиц на волновое воздействие, различие в поведении потоков в магнитосфере и высыпающихся в ионосферу, и др.

Заключение

В работе показана связь полюидальных геомагнитных Pc5 пульсаций, наблюдаемых на геостационарной орбите, с Pc5 пульсациями в риометрическом поглощении и с Pc5 пульсациями в потоках энергичных электронов в магнитосфере. Однако такая связь неоднозначна. Хотя для некоторых временных интервалов наблюдается совпадение спектральных максимумов в модуле магнитного поля на GOES-10, в риометрическом поглощении на сопряженной станции МСМ и в потоках энергичных электронов на близком геостационарном аппарате LANL-1991, зачастую отклик в потоках захваченных и высыпающихся частиц на интенсивные квази-монохроматические полюидальные геомагнитные Pc5 пульсации виден слабо.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 12-05-98522 и 12-05-00273, а также Программ Президиума РАН №22 и №4.

Список литературы

- Меликян К.А., В.А. Пилипенко, О.В. Козырева, Пространственная структура Pc5 волн во внешней магнитосфере по наблюдениям на спутниках Themis, Космические исследования, 50, №5, 2012.
- Магер П.Н., Климушкин Д.Ю., Генерация альфвеновских волн движущейся неоднородностью плазмы в магнитосфере, Физика плазмы, 33, 435-442, 2007.
- Barfield J.N., R.L. McPherron. Statistical characteristics of storm-associated Pc5 micropulsations observed at synchronous equatorial orbit, J. Geophys. Res., 77, 4720, 1972.
- Coroniti, F.V., C.F. Kennel, Electron precipitation pulsations, J. Geophys. Res., 75, 1279, 1970.
- Kivelson M.G., D.J. Southwood, Charged particle behavior in low frequency geomagnetic pulsations, 4. Compressional waves, J. Geophys. Res., 90, 1486, 1985.
- Klimushkin D.Yu., Resonators for hydromagnetic waves in the magnetosphere, J. Geophys. Res., 103, 2369, 1998.
- Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Spatial localization and azimuthal wave numbers of Alfvén waves generated by drift-bounce resonance in the magnetosphere, Ann. Geophys., 23, 3775, 2005.
- Southwood D.J., M.G. Kivelson, Charged particle behavior in low frequency pulsations: 1. Transverse waves, J. Geophys. Res., 86, 5643, 1981.