

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.013

Pi3 ПУЛЬСАЦИИ ПО ДАННЫМ ОДНОВРЕМЕННЫХ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 08.09.2017

В.Б. Белаховский¹, В.А. Пилипенко²

¹ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия; e-mail: belakhov@mail.ru

²ФГБНУ «Институт космических исследований РАН», г. Москва, Россия;
e-mail: pilipenko_va@mail.ru

Аннотация. Исследованы пространственно-временные характеристики геомагнитных Pi3 пульсаций (периоды 5-20 мин) во время магнитной бури 08.09.2017. Используются данные наземных магнитометров сетей CARISMA, THEMIS, риометров сети NORSTAR, спутников GOES. Корреляция Pi3 пульсаций на земной поверхности и в магнитосфере невысокая. Колебания имеют заметную компоненту сжатия геомагнитного поля и способны заметно модулировать потоки захваченных и высыпающихся энергичных электронов. Обсуждаются возможные механизмы генерации Pi3 колебаний.

Введение

При развитии суббури первоначальная неустойчивость магнитосферной плазмы развивается в области замкнутых силовых линий, а затем выведенная из равновесия магнитосферная система высвобождает основную энергию в результате пересоединения в хвосте. Во время геомагнитной суббури в ночном секторе магнитосферы разыгрывается целый комплекс волновых процессов. Неотъемлемым элементом суббури являются Pi2 пульсации (периоды 50-150 секунд). Эти пульсации возникают при резкой активизации магнитосферной активности – начале взрывной фазы суббури (breakup), и являются “маркером”, отмечающим переход медленной фазы роста возмущения ночной магнитосферы во взрывную фазу [Pilipenko et al., 2005]. Возбуждение Pi2 пульсаций во время брейккапа сопровождается интенсификацией полярных сияний, усилением и перестройкой ионосферных и магнитосферных продольных токов, и всплеском высыпания энергичных электронов. Кроме того, авроральные активизации сопровождаются всплесками широкополосных электромагнитных шумов диапазона 0.1-10 Гц (Pi1B).

Также на фоне суббури или усиления стационарной магнитосферной конвекции (SMC) наблюдаются более длиннопериодные иррегулярные Pi3 (или Ps6) пульсации с периодом ~5-20 минут и амплитудой в сотни нТл [Cheng et al., 2014; Martines-Bedenko et al., 2022]. Эти пульсации представляют собой не гармонические колебания, как Pc3-5 или Pi2 пульсации, а последовательность квазипериодических импульсов. Данные пульсации наблюдались как на земной поверхности, так и в магнитосфере, не только во время фазы роста суббури, но в течение всего периода суббуровой активности. Предложено несколько качественных теоретических моделей, описывающих картину возбуждения Pi3 колебаний, так или иначе согласующихся с наземными и спутниковыми наблюдениями, но окончательно их физическая природа так и остается невыясненной.

Во многих теоретических моделях неустойчивости, приводящей к развитию взрывной фазы суббури, альвеновские колебания силовых линий и их активное взаимодействие с ионосферой играют принципиальную роль [Rae et al., 2014]. Поэтому изучение Pi3 пульсаций, являющихся по существу тонкой структурой суббури, приобретает особое значение, т.к. понимание физической природы данных колебаний может лучше понять физическую природу самой суббури.

Пульсации Pi3 имеют особое значение не только для фундаментальной космической физики и ее приложений. Благодаря крутизне фронтов импульсов пульсации Pi3 индуцируют наиболее значительные вариации dB/dt на земной поверхности, и вызывают интенсивные всплески геоиндуцированных токов в линиях электропередач [Belakhovsky et al., 2019; Пилипенко, 2021].

В данной работе будут рассмотрены Pi3 пульсации во время магнитной бури 08.09.2017. Это рассмотрение, по нашему мнению, ставит ряд важных вопросов о физической природе Pi3 пульсаций.

Данные наблюдений

Нами использованы данные наземных магнитометров сетей CARISMA и THEMIS на севере Канады, данные по магнитному полю и потокам энергичных заряженных частиц со спутников GOES. Для регистрации потоков высыпающихся заряженных частиц использованы данные риометров сети NORSTAR. Параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) брались из базы данных OMNI. Наличие большого числа

пунктов наземных и спутниковых наблюдений в изучаемом событии (показаны на рис. 1) дает возможность более глубоко исследовать механизмы возбуждения P₁₃ пульсаций. Географические и геомагнитные координаты станций приведены на сайтах (<https://www.carisma.ca/>) и (<https://aurora.phys.ucalgary.ca/norstar/rio/>), (https://themis.igpp.ucla.edu/instrument_gmags.shtml).

Событие 8 сентября 2017

Во время сильного возмущения космической погоды 7-8 сент. 2017 произошло три активизации авроральной и геомагнитной активности: 7-8 сентября 20 UT – 05 UT, при котором началась суперсуббура на фоне магнитной бури с Dst~ - 140 нТл с эпицентром в Скандинавии; 8 сентября на фоне магнитной бури с Dst~ - 130 нТл с эпицентром в Северной Канаде. Последний мы и рассматриваем.

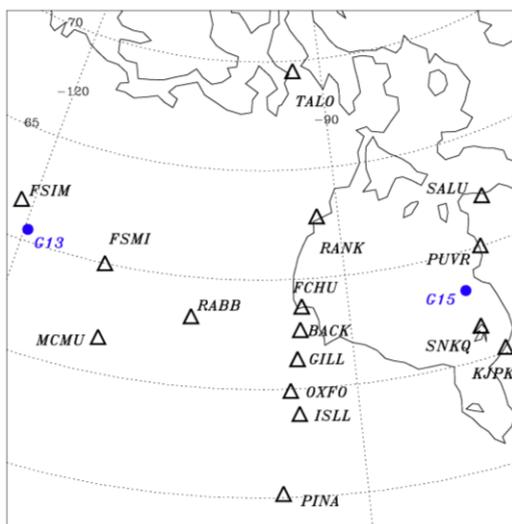


Рисунок 1. Расположение наземных станций (треугольники), и геомагнитные проекции спутников GOES-13, GOES-15 (кружки).

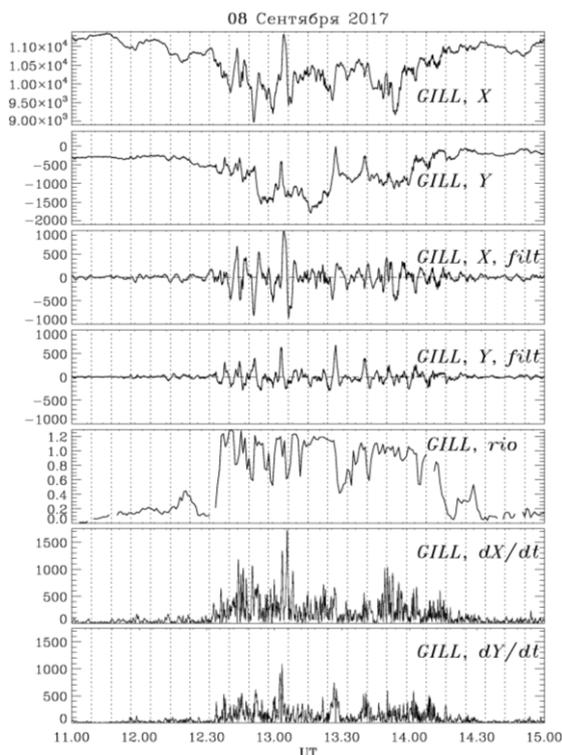


Рисунок 2. Вариации магнитного поля и риометрического поглощения на станции GILL профиля CARISMA 08.09.2017, 11-15 UT: X и Y компоненты [нТл], отфильтрованные X и Y компоненты [нТл], риометр [дБ], значения производной геомагнитного поле dX/dt и dY/dt [нТл/мин].

P₁₃ пульсации наблюдались в течение всего периода развития суббуревой активности (рис. 2). Для выделения P₁₃ пульсаций из исходных вариаций геомагнитного поля были вычтены низкочастотные вариации (рис. 2,3). Максимальная амплитуда пульсаций наблюдается в авроральной зоне на геомагнитной широте ~66° (станция CGL). Анализ распределения P₁₃ пульсаций по геомагнитной широте (рис. 3.) показывает их слабую корреляцию друг с другом. Сопоставление P₁₃ пульсаций на азимутально разнесенной паре станций FSIM (геомагнитная долгота 294.3°) – FSMI (306.9°), расположенных на одной геомагнитной широте 67.2°, также показывает слабую связь между вариациями геомагнитного поля на относительно близко расположенных станциях, что говорит о мелкомасштабности данных колебаний.

Лучше всего пульсации выражены в X-компоненте геомагнитного поля на Земле, что соответствует азимутальной компоненте геомагнитного поля на геостационарных спутниках GOES. С началом суббурь наблюдается резкое увеличение потоков энергичных частиц в районе геостационарной орбиты (рис. 4), и увеличение высыпания электронов по данным риометрического поглощения (рис. 2).

P₁₃ пульсации в геомагнитном поле вызывают одновременные пульсации в риометрическом поглощении, что свидетельствует о модуляции потоков высыпающихся в ионосферу энергичных и надтепловых электронов. Однако корреляция между геомагнитными пульсациями и пульсациями риометрического поглощения невысокая (рис. 2).

X-компонента геомагнитных Pi3 колебаний на станции FSIM коррелирует с азимутальной Vp-компонентой на спутнике GOES-13 (рис. 4), что говорит о повороте эллипса поляризации рассматриваемых колебаний на $\pi/2$ при переходе через ионосферу. Поворот эллипса поляризации характерен для возмущений альвеновского типа, переносящих нестационарные продольные токи. Данные GOES-13 показывают наличие заметной компоненты сжатия Vt в структуре поля магнитосферных Pi3 пульсаций (рис. 4). Такая структура колебаний характерна для полоидальной альвеновской моды в плазме конечного давления (баллонной моды).

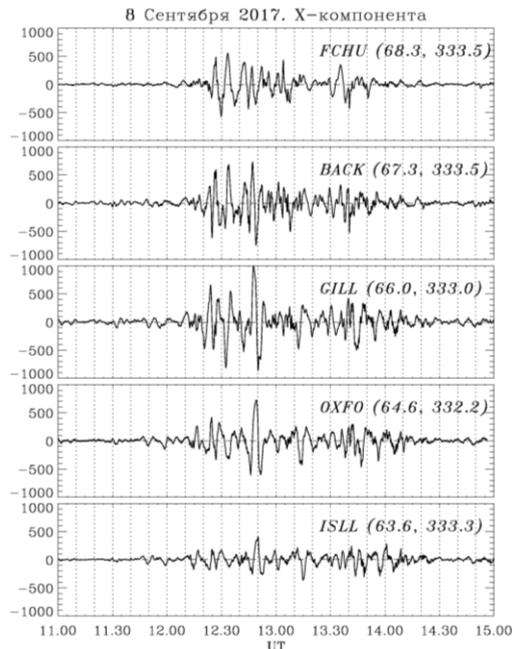


Рисунок 3. Вариации X-компоненты геомагнитного поля [нТл] с убраным низкочастотным трендом по данным меридиональной цепочки станций сети CARISMA 08.09.2017 в интервале 11-15 UT.

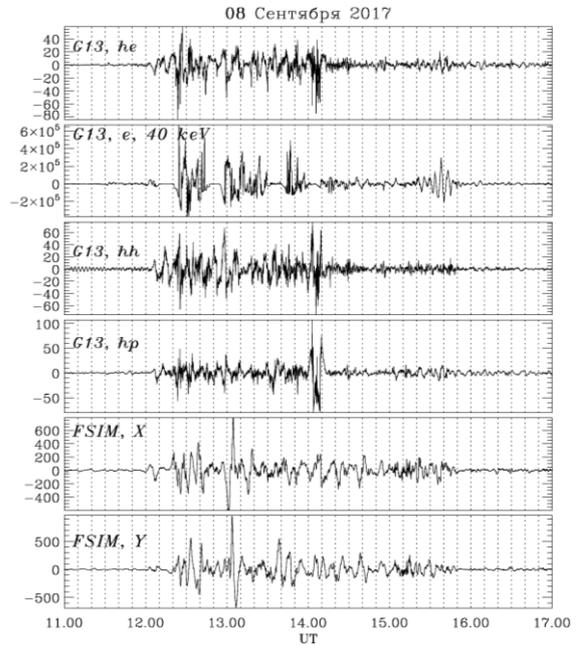


Рисунок 4. Вариации геомагнитного поля на спутнике GOES-13 с убраным низкочастотным трендом (Vt, Ve, Vn-компоненты), вариации потоков электронов (40 кэВ) на GOES-13, X- и Y-компоненты геомагнитного поля на станции FSIM 08.09.2017.

Pi3 геомагнитные колебания модулируют потоки электронов с энергией 40 кэВ в магнитосфере, как видно из данных детектора частиц спутника GOES-13 (рис. 4). Однако корреляция между Pi3 пульсациями в геомагнитном поле и потоках заряженных частиц невысокая.

Обсуждение

Pi3 пульсации — одни из немногих оставшихся УНЧ колебательных явлений, физический механизм которых так и не установлен окончательно, несмотря на многочисленные морфологические исследования. Вероятно, существует несколько возможных механизмов квазипериодических возмущений в полосе Pi3, хотя критерий их разделения не найден.

Спорадически возникающие квазипериодические вариации параметров солнечного ветра или межпланетного магнитного поля (ММП) в диапазоне Pi3 могут вызывать планетарный отклик внутри магнитосферы и на Земле. Эти глобальные колебания, вероятно, связаны с колебаниями полости магнитосферы [Leonovich et al., 2005]. Однако в данном событии вариаций диапазона Pi3 в параметрах солнечного ветра и ММП не наблюдалось. Утренние/вечерние фланги внешней магнитосферы с плазмой конечного давления являются областью, благоприятной для возбуждения плазменных неустойчивостей. Инжекция энергичных электронов на утренний фланг и горячих протонов на вечерний фланг во время суббури оказалась триггером возбуждения длиннопериодных волн [James et al., 2013].

Пульсации Pi3 могут быть связаны с квазипериодическими быстрыми потоками в направлении Земли (BBF) в плазменном слое, которые предположительно вызваны пульсационным режимом пересоединения в хвосте магнитосферы [Wei et al., 2021]. Однако характерные периоды квази-периодических BBF лежат в более высокочастотном диапазоне Pi2 [Wu et al., 2017]. Однако многие традиционные модели физики УНЧ-волн, в которых участвуют альвеновские колебания квази-дипольных силовых линий, не могут быть применены к интерпретации Pi3. Например, моделирование фундаментальной моды собственных колебаний силовых линий на широте станции Гакона (Аляска) для реалистичных параметров магнитосферной плазмы дает оценку ~ 5 мГц, что намного выше типичной частоты Pi3 наблюдаемых на этой станции [Guido et al., 2014].

Остается непонятной причина больших периодов Pi3 пульсаций (15-20 минут) во время активной фазы суббури, намного больших, чем период резонансных Pc5 альвеновских колебаний (3-10 мин) на тех же широтах, наблюдаемых на фазе восстановления суббури. Мы полагаем, что Pi3 пульсации имеют иную физическую природу, чем Pc5 пульсации, занимающие близкий частотный диапазон, и наблюдающиеся на тех же широтах. Изменение конфигурации силовых линий геомагнитного поля на ночной стороне магнитосферы во время сильных суббуревых возмущений (вытягивание в хвост) может привести к увеличению периодов колебаний. Кроме того, межмодовое зацепление между альвеновскими и медленными магнитозвуковыми колебаниями [Мазур и др., 2014] приводит к появлению двух ветвей МГД колебаний: квази-альвеновских с периодом T порядка альвеновского периода T_A и смешанной поляризации $V_z \sim V_\perp$, и медленной моды с большими периодами $T \gg T_A$, но большой компрессионной магнитной компонентой $V_z \gg V_\perp$. Спутниковые наблюдения поляризации Pi3 колебаний показывают, что они могут соответствовать медленной моде.

Рассмотренное нами событие дополнительно ставит ряд вопросов о физической природе Pi3 пульсаций. Корреляция Pi3 пульсаций на земной поверхности и в магнитосфере невысокая. Колебания имеют заметную компоненту сжатия геомагнитного поля и способны заметно модулировать потоки захваченных и высыпающихся энергичных электронов. Отсутствие корреляции между вариациями геомагнитного поля и поглощения космических радишумов может быть связано с тем, что магнитный эффект на земной поверхности создается не только полями волны, но и токами ионосферы, сильно модулированными высыпаниями энергичных электронов.

Заключение

Исследованы иррегулярные пульсации Pi3 во время магнитной бури 08.09.2017 по данным спутниковых наблюдений магнитного поля и потоков энергичных электронов на геостационарном спутнике и наземных геомагнитных и риометрических наблюдений. С началом суббури наблюдается резкое увеличение потоков энергичных частиц, увеличение высыпания электронов. Pi3 иррегулярные пульсации интенсивно модулируют потоки электронов в магнитосфере, риометрическое поглощение.

Корреляция Pi3 пульсаций на земной поверхности и в магнитосфере невысокая. Колебания имеют заметную компоненту сжатия геомагнитного поля и способны заметно модулировать потоки захваченных и высыпающихся энергичных электронов. Отсутствие корреляции между вариациями геомагнитного поля и поглощения космических радишумов может быть связано с тем, что магнитный эффект на земной поверхности создается не только полями волны, но и токами ионосферы, сильно модулированными высыпаниями энергичных электронов.

Благодарность. Исследование выполнено за счет госзаданий ПГИ и ИКИ.

Литература

1. Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А. Продольная структура баллонных МГД возмущений в модельной магнитосфере // Космические исследования. Т.52, С.187–196, 2014.
2. Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. Т.7, №3, С.73–110, 2021. <https://doi.org/10.12737/szf-73202106>
3. Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M. et al. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // Journal of Space Weather and Space Climate. V.9, A18, 2019.
4. Guido T., Tulegenov B., Streltsov A.V. Large-amplitude ULF waves at high latitudes // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. V.119, P.102–109, 2014.
5. James M.K., Yeoman T.K., Mager P.N., Klimushkin D.Y. The spatio-temporal characteristics of ULF waves driven by substorm injected particles // J. Geophys. Res. Space Physics. V.118, P.1737–1749, 2013.
6. Leonovich A.S., Mazur V.A. Why do ultra-low-frequency MHD oscillations with a discrete spectrum exist in the magnetosphere? // Annales Geophysicae. V.23, P.1075–1079, 2005.
7. Martines-Bedenko V.A., Pilipenko V.A., Hartinger M., Partamies N. Conjugate properties of Pi3/Ps6 pulsations according to Antarctica-Greenland observations // Russian Journal of Earth Sciences. V.22, N4, ES4006, 2022. doi:10.2205/2022ES000805
8. Pilipenko V., Mazur N., Fedorov E. et al. Excitation of Alfvén impulse by the anomalous resistance onset on the auroral field lines // Annales Geophysicae. V.23, P.1455–1465, 2005.
9. Rae I.J., Murphy K.R., Watt C.E.J., et al. Field line resonances as a trigger and a tracer for substorm onset // J. Geophys. Res. V.119, P.5343–5363, 2014.
10. Vaivads A., Baumjohann W., Georgescu E. et al. Correlation studies of compressional Pc5 pulsations in space and Ps6 pulsations on the ground // Journal Geophysical Research. V.106, P.29,797–29,806, 2001.
11. Wei D., Dunlop M.W., Yang J. et al. Intense dB/dt variations driven by near-Earth bursty bulk flows (BBFs): A case study // Geophysical Research Letters. V.48, e2020GL091781, 2021.
12. Wu Q., Du A.M., Volwerk M. et al. The distribution of oscillation frequency of magnetic field and plasma parameters in BBFs: THEMIS statistics // J. Geophys. Res. V.122, P.4325–4334, 2017.