

О ПРИРОДЕ ИСТОЧНИКОВ ВСПЛЕСКА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc1 ПО ОДНОВРЕМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ НА ЗЕМЛЕ И НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

¹В.А. Пархомов, ^{2,3}Б. Цэгмэд, ^{4,5}А.В. Дмитриев

ON THE ORIGIN OF A BURST OF UNSTRUCTURED Pc1 PULSATIONS ACCORDING TO SIMULTANEOUS OBSERVATIONS FROM THE GROUND AND GEOSTATIONARY ORBIT

¹V.A. Parkhomov, ^{2,3}B. Tsegmed, ^{4,5}A.V. Dmitriev

Исследованы особенности всплесков неструктурированных пульсаций диапазона периодов Pc1 ($T=2\div 5$ с) по одновременным наблюдениям на геостационарных спутниках GOES-10–12 и на станциях наземной сети магнитометров CARISMA. Возбуждение пульсаций инициировано контактом магнитосферы с межпланетной ударной волной (МУВ) 19.11.2007 г. На геостационарной орбите обнаружен дрейф источника неструктурированных Pc1 на восток: всплеск пульсаций сначала наблюдался на GOES-11 (MLT~09 ч), затем на GOES-12 (MLT~13 ч) и на GOES-10 (MLT~14 ч). В наземных обсерваториях, отстоящих одна от другой по долготе на $\sim 40^\circ$, начало возбуждения колебаний запаздывает к западу и востоку от срединной обсерватории. На резком переднем фронте колебаний наблюдается нарастание частоты от минимальных до максимальных значений в течение ~ 150 с. По разности времен начала регистрации пульсаций на спутниках и Земле определены скорости перемещения источника пульсаций. Для интерпретации наблюдаемых закономерностей в динамике пульсаций рассматриваются три модели: 1) генерация пульсаций в результате дрейфа к востоку облака энергичных электронов, ускоренных при сжатии магнитосферы; 2) генерация пульсаций в выпуклостях плазмосферы (или оторвавшихся дактах); 3) модуляция условий генерации пульсаций распространяющейся по магнитопаузе поверхностной волной, которая генерируется в области контакта МУВ с магнитопаузой.

We examined the features of bursts of unstructured Pc1 geomagnetic pulsations in the range of periods ($T=2\div 5$ s), based on simultaneous observations by geostationary satellites GOES-10, 11, 12, and by ground-based magnetometer network CARISMA. The excitation of pulses was due to the contact of the magnetosphere with the interplanetary shock wave (ISW) on 19 November 2007. We detected the eastward drift of the source of unstructured Pc1 bursts in the geostationary orbit: the burst was first observed by GOES-11 (MLT~09 h), then by GOES-12 (MLT~13 h) and, finally, by GOES-10 (MLT~14 h). At the ground-based observatories with the longitudinal distance of $\sim 40^\circ$ between them, the oscillation onset delayed in the west and east observatories as compared to the median Fort Simpson Observatory. On the sharp leading edge of oscillations, we observed an increase in the frequency that lasted for about 150 seconds from the minimum to maximum values. We determined the velocity of travel of the pulsation source from the difference between the moments when pulsations were first recorded on the satellites and on the Earth. To interpret the observed patterns of pulsation, we considered three alternative models: 1. Generation of pulsations as a result of eastward drifting clouds of energetic electrons accelerated due to the compression of the magnetosphere. 2. Generation of pulsations in the plasmaspheric bulges (or detached ducts). 3. Modulation of the generation conditions of pulsations by the surface wave which propagates along the magnetopause and is generated in the ISW/magnetopause contact region.

Введение

Электромагнитные ионные циклотронные (ЕМЦ) волны, наблюдаемые на Земле в виде геомагнитных пульсаций Pc1 ($T\sim 0.2\div 5$ с), являются результатом ионно-циклотронной неустойчивости протонов радиационного пояса и, распространяясь вдоль силовых линий геомагнитного поля, играют важную роль в динамике магнитосферы [Гульельми, 1968]. Генерация волн определяется состоянием магнитосферы, и вероятность их наблюдения возрастает во время магнитных бурь и суббурь. Возбуждение Pc1 часто связано с внезапным началом (SSC) магнитной бури [Kangas et al., 1998]. Эффекты, вызываемые межпланетными ударными волнами (МУВ), и модель генерации пульсаций Pc1 в окрестности дневной магнитопаузы рассмотрены в работе [Троицкая и др., 1979].

Известно, что в частотном диапазоне Pc1 выделяют два типа пульсаций – структурированные (жемчужины) и неструктурированные. Главная особенность неструктурированных Pc1 заключается в регистрации на ограниченных участках земной поверхности в утренне-полуденные часы [Пархомов, Рахматуллин, 1979]. Локальность наблюдений пульсаций объясняется тем, что ионно-циклотронные волны возбуждаются и распространяются в магнитосферных волноводах-дактах – оторвавшихся от плазмосферы волокнах плотной холодной плазмы, вытянутых вдоль силовых линий геомагнитного поля. Механизм

локализации всплесков пульсаций Pc1 в магнитосферных дактах в результате действия плазменного волновода предложен в [Buzevich et al., 1987].

Результаты координированных наземно-спутниковых наблюдений дневных структурированных Pc1 (string-of-pearls) в частотном диапазоне 0.2–1 Гц, генерация которых связана со сжатием магнитосферы скачком давления солнечного ветра (СВ) ~ 4 нПа, представлены в статье [Usanova et al., 2008]. Показано, что на Земле при низкой геомагнитной активности ($K_p < 3$, $D_{st} \sim -10$) наблюдались пакеты электромагнитных ионно-циклотронных волн с периодом повторения ~ 3 мин. В космосе ЕМЦ-волны наблюдались когерентно тремя спутниками THEMIS-D, -C и -E. Одновременные наземно-спутниковые наблюдения позволили авторам определить источник волн в плазмосфере и заключить, что ЕМЦ волновая активность пространственно локализована и совпадает с областью низкого спутникового потенциала, интерпретируемого авторами как нахождение источника пульсаций внутри магнитопаузы.

Представляется интересным исследовать на основе одновременных спутниковых и наземных наблюдений закономерности динамики неструктурированных Pc1.

1. Данные наблюдений и методы анализа

В настоящей работе исследуются всплески неструктурированных Pc1-пульсаций ($T=2\div 5$ с) по-

сле SSC слабой магнитной бури ($D_{st} \sim 60$ нТл) 19.11.2007 г. Использованы данные одновременных магнитометрических наблюдений на геостационарных спутниках GOES-10, -11, -12 с шагом дискретизации 0.512 с [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public]. Наземные данные получены на магнитометрах сети CARISMA с шагом дискретизации 1 с [Mann et al., 2008; http://129.128.234.110:8080/ssdp/jsp/logon.jsp]. Для приведения к одинаковому временному шагу ряды данных наземных наблюдений пульсаций интерполированы кубическим сплайном. Для анализа рядов данных применялись цифровой фильтр в узкой полосе частот ($T=2 \div 5$ с) с использованием метода Марме [Marmet, 1979] и спектрально-временной анализ. Координаты спутников в 18:10 UT приведены в табл. 1, а их положение в рассматриваемый временной интервал показано на рис. 1, а. Координаты геомагнитных обсерваторий приведены в табл. 2, а на рис. 1, б дана схема их расположения по местному времени в период наблюдения Pc1.

2. Геофизическая обстановка

Приход слабой МЮВ со скачком давления на фронте $\Delta P \sim 1.8$ нПа при северной ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) зарегистрирован на спутнике Geotail в 18:03 UT (см. рис. 2). Спутник находился перед фронтом околосолнечной ударной волны на расстоянии $\sim 12R_E$ от нее (табл. 1). Вследствие резкого усиления давления СВ магнитопауза смещена на $\sim 2.5R_E$ (по данным [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/]). SSC регистрируется

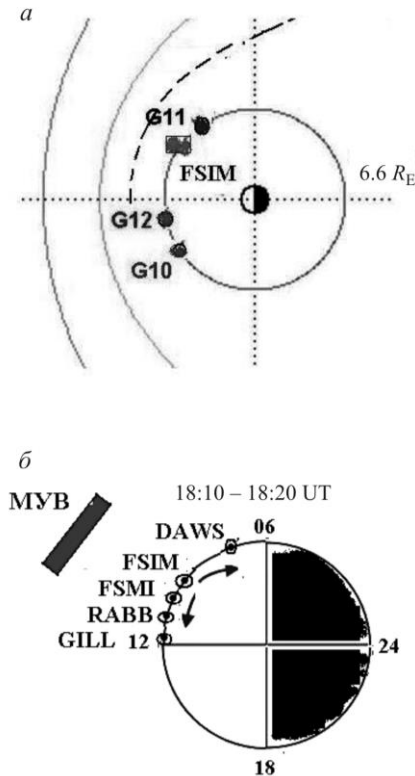


Рис. 1. Положение спутников 19.11.2007 г. в 18:10 UT. Штриховой линией показано новое положение магнитопаузы после смещения по данным [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/]. Прямоугольником обозначено положение обсерватории FSIM (а). Положение наземных обсерваторий по местному времени и фронта МЮВ 19.11.2007 г. в 18:10 UT (б).

на дневной и ночной сторонах Земли. Его можно классифицировать как SSC*, поскольку в высокоширотных обсерваториях дневной авроральной зоны с 07 до 20 ч регистрируется предварительный обратный импульс. На рис. 2 видно, что в 18:11 UT усиливается ток на магнитопаузе, что отражается в резком возрастании $SIM-H$ -индекса ($\Delta = 16$ нТл). Одновременно происходит усиление авроральной магнитной активности: $\Delta AU = 110$ нТл, $\Delta AL = 30$ нТл, $\Delta AE = 62$ нТл [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/].

Таблица 1

Положение спутников в GSM-системе координат

Спутник	Радиус, R_E	x, R_E	y, R_E	z, R_E
GOES-10	6.6	5.1	3.7	2.1
GOES-11	6.6	4.8	-4.3	1.4
GOES-12	6.6	5.9	2.1	2.23
Geotail	27.2	26.7	-2.8	-4.4

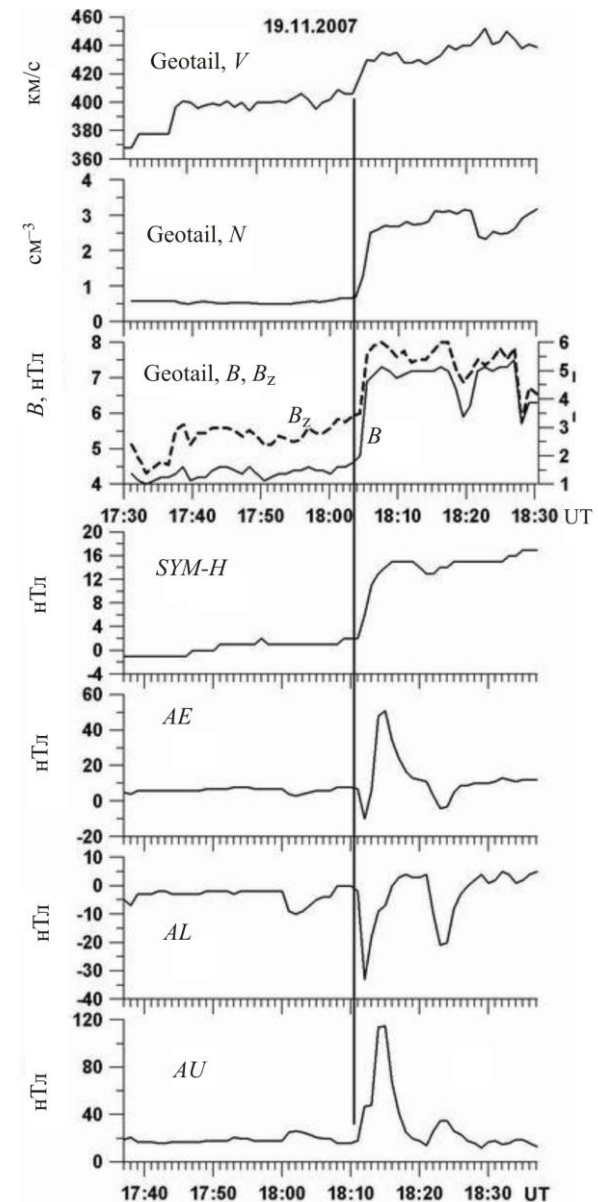


Рис. 2. Вариации параметров V, N солнечного ветра и ММП B, B_z по наблюдениям на спутнике Geotail (указано время спутника) и планетарные геомагнитные индексы $SIM-H, AE, AL, AU$.

Таблица 2

Координаты геомагнитных обсерваторий

Название обсерватории	Обозначение	Географ. широта	Географ. долгота	Геомаг. широта	Геомаг. долгота	L
Dawson	DAWS	64.05	220.89	65.90	273.89	6.09
Fort Simpson	FSIM	61.76	238.77	67.23	294.29	6.78
Fort Churchill	FCHU	58.76	265.92	68.32	333.54	7.44
Fort Smith	FSMI	60.02	248.05	67.28	306.90	6.81
Gull Lake	GULL	50.06	251.74	58.20	314.92	3.66
Gillam	GILL	56.38	265.36	66.03	333.05	6.15
Island Lake	ISLL	53.86	265.34	63.62	333.36	5.15
FORT McMurray	MCMU	58.66	248.79	64.17	309.20	5.35
Ministik Lake	MSTK	53.35	247.03	60.61	307.99	4.22
Pinawa	PINA	50.20	263.96	59.98	331.75	4.06
Rabbit Lake	RABB	58.22	256.32	66.85	319.11	6.57
Rankin Inlet	RANK	62.82	267.89	72.22	335.97	10.89
Taloyak	TALO	69.54	266.44	78.28	330.93	N/A

Резкое возрастание напряженности геомагнитного поля на геостационарном спутнике GOES-11, который находился в утреннем секторе магнитосферы, наблюдалось в ~18:09 UT (рис. 4, а). На всех геостационарных спутниках SSC вызывает цуг пульсаций Pc 4–5 ($T \sim 150$ с).

Определение момента SSC на Земле сопряжено с проблемами, которые детально изложены в обзоре [Curto et al., 2007]. В рассматриваемом случае момент SSC можно определить тремя способами.

1. По резким скачкам H -компоненты на стандартной магнитограмме (рис. 3) SSC* можно определить в 18:11 UT.

2. По внезапному усилению интенсивности пульсаций Pc1 в 18:09 UT на станции FSIM. Внезапное усиление Pc1 на спектрограммах представляется в виде ярко выраженного резкого наклонного фронта (ΔT) (рис. 4, а).

3. По резкому положительному возрастанию X -компоненты в обсерваториях FSIM в 18:09:40 UT и DAWS в 18:10:40 UT и резкому отрицательному изме-

нению X -компоненты на станции GILL в 18:10:40 UT (обозначено стрелками на рис. 4, а).

Приведенные данные с высоким временным разрешением показывают неодновременность SSC* в разнесенных по долготе обсерваториях – наблюдается запаздывание SSC* к западу и востоку от обсерватории FSIM. Это позволяет определить область взаимодействия MYB на долготе 238.77°, или в ~09:40 MLT.

3. Пространственные особенности генерации Pc1 на геостационарной орбите и на Земле в секторе 07–12 MLT

Рассмотрим пространственные спектрально-амплитудные особенности пульсаций.

Как видно на динамических спектрах на рис. 4, б–5, 7, резкое смещение магнитопаузы вызвало генерацию пульсаций на геостационарной орбите и возрастание интенсивности пульсаций на станциях сети CARISMA. На GOES-11 регистрируются слабоструктурированные (отсутствие элементов с дисперсией по частоте) пульсации в диапазоне периодов 2–5 с, а затем полоса периодов сужается до 2.5–3.5 с. Видна хаотичная модуляция интенсивности пульсаций. Подобный режим пульсаций наблюдается со сдвигом по времени на всех геостационарных спутниках.

Обращают на себя внимание спектральные различия геомагнитных пульсаций, регистрируемых на геостационарной орбите и на Земле.

Во-первых, на Земле SSC вызывает возбуждение колебаний не в одном, а в двух диапазонах периодов 1.8–1.3 и 2.5–4 с (на рис. 5, 7 короткопериодный диапазон обозначен прямоугольником). Во-вторых, средний период колебаний (~3.3 с) на геостационарной орбите остается постоянным в течение всего времени регистрации, тогда как для наземных пульсаций характерны две противоположные тенденции: средний период низкочастотной компоненты Pc1 (2.5–4 с) увеличивается к концу события, а средний период высокочастотной компоненты (1.8–1.3 с), наоборот, уменьшается. Главной особенностью начальной фазы генерации пульсаций на геостационарной орбите и на Земле является резкий фронт с уменьшением периода

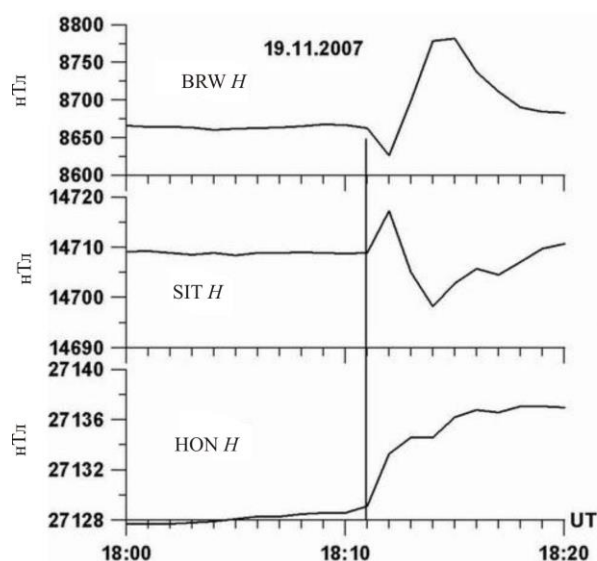


Рис. 3. Фрагменты магнитограмм обсерваторий утреннего сектора от авроральной зоны до экваториальных широт. Начало SSC* в 18:11 UT.

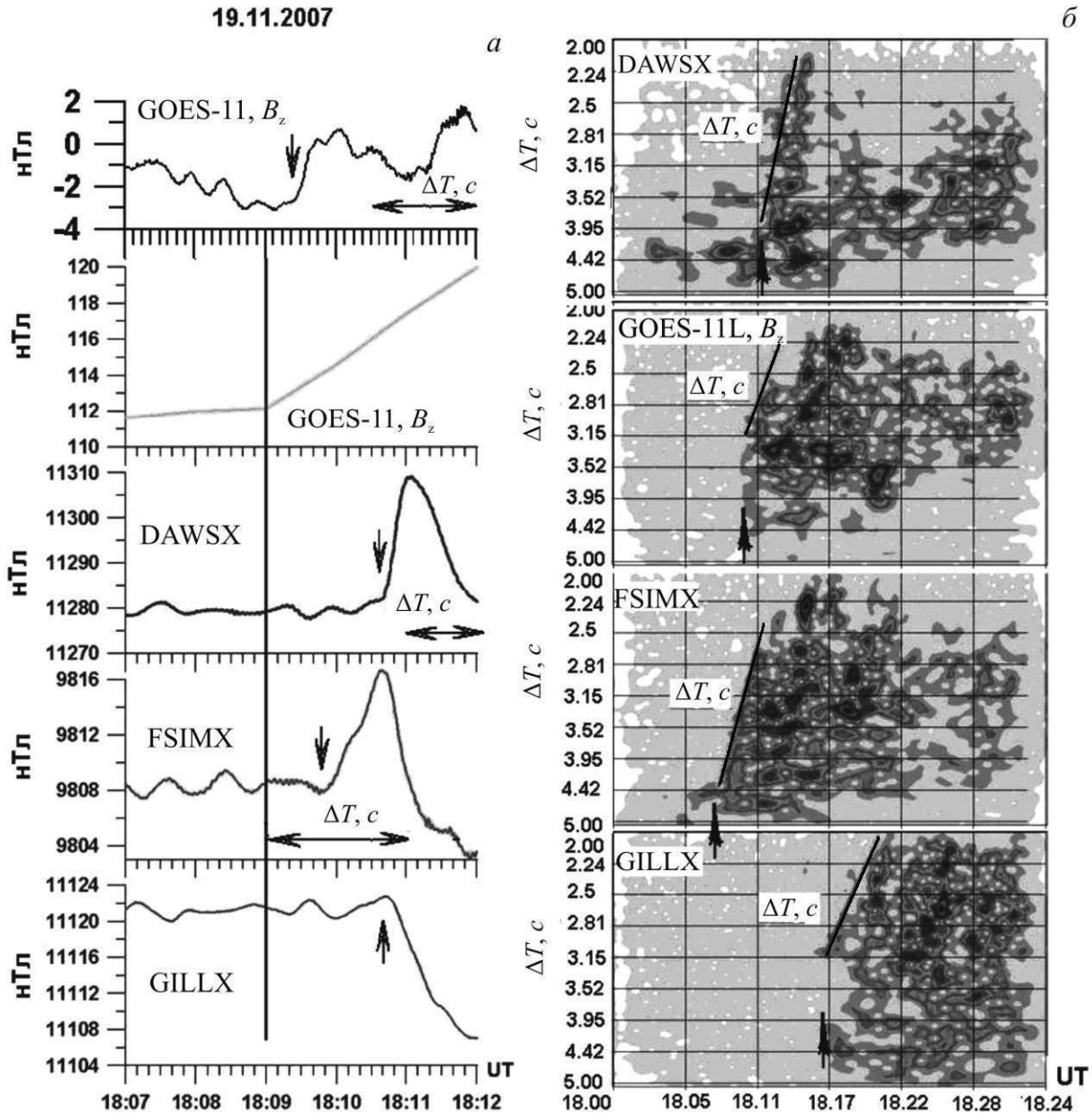


Рис. 4. Вариации геомагнитного поля, зарегистрированные двумя типами магнитометров на спутнике GOES-11 и в наземных обсерваториях Dawson ($\Lambda=220.89^\circ$) и Gilliam ($\Lambda=265.36^\circ$) сети CANOPUS, расположенных симметрично относительно обсерватории Fort Simpson ($\Lambda=238.77^\circ$). Сплошной вертикальной линией обозначен момент SSC на спутнике GOES-11. Короткими вертикальными стрелками показан момент SSC на Земле. Горизонтальной стрелкой обозначено время нарастания ΔT частоты пульсаций Pc1 (а). Динамические спектры пульсаций Pc1, регистрируемых на спутнике GOES-11 (B_z -компонента) и в наземных обсерваториях Dawson, Fort Simpson и Gilliam (X-компоненты). Сплошной линией обозначен резкий передний фронт пульсаций. ΔT – время нарастания частоты до максимальных значений. Короткими вертикальными стрелками обозначено начало пульсаций Pc1 на спутнике и в наземных обсерваториях (б).

пульсаций со временем (наклон переднего фронта рис. 4, б). Особенно отчетливо и с наименьшим наклоном фронта наблюдается на станции FSIM и с наибольшими углами на станции DAWS и спутнике GOES-11, при этом углы наклона начальной части спектра примерно одинаковы на спутнике и на наземной станции. Время нарастания частоты совпадает со временем нарастания динамического давления на фронте неоднородности СВ от начального до максимального значения и временем перемещения магнитопаузы. Таким образом, можно считать, что резкое смещение магнитопаузы является причиной наклонного переднего фронта пульсаций, который виден на динамиче-

ских спектрах. Это дает основание предполагать, что смещение магнитопаузы является причиной синхронизации излучателей на различных силовых линиях, что отражается в подобию переднего фронта излучений, а уменьшение периода, вероятно, связано с изменением гирочастоты ионов вследствие нарастания напряженности магнитного поля в области развития циклотронной неустойчивости.

4. Дрейф источника

На рис. 1, а, б показаны положение наземных станций и проекции геостационарных спутников на поверхность Земли. Видно, что проекция спутника

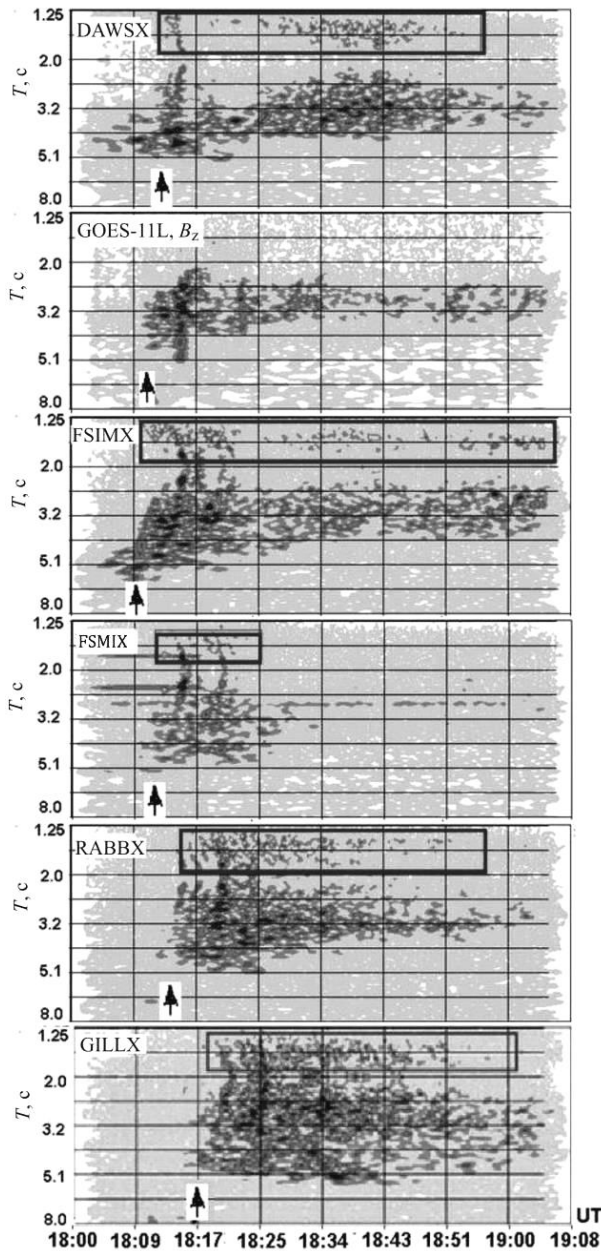


Рис. 5. Динамические спектры пульсаций, полученные по данным спутника GOES-11 и наземных обсерваторий вдоль геомагнитной параллели $\sim 67^\circ$. Стрелками указано начало генерации Pc1. Прямоугольником обозначен диапазон периодов 1.25–1.8 с.

GOES-11 находится между станциями FSIM и DAWS. Используем это обстоятельство для определения скорости движения источника возмущения.

На рис. 4–6 приведены фрагменты магнитограмм спутниковых и наземных магнитометров и динамические спектры пульсаций на GOES-11 и наземных станциях, находящихся к западу и к востоку от наземной проекции положения спутника.

Особенностью наземного отклика, видимой на рис. 4, 5, 7, является характер движения источника пульсаций, который определяется по времени начала резкого фронта пульсаций. Начало резкого фронта Pc1 запаздывает к западу ($\Delta t = 190 \pm 10$ с) и к востоку ($\Delta t = 440 \pm 10$ с) от обсерватории FSIM. На спектрограммах этой обсерватории резкий передний фронт проявляется наиболее отчетливо (рис. 4, б–5, 7). Угловые расстояния между обсерваториями равны 17.88° и

26.59° соответственно, отсюда скорость распространения возмущения 0.09 и 0.06 град/с, или ~ 10 км/с в западном направлении и 7 км/с в восточном.

Амплитуды колебаний, регистрируемых на спутниках, превосходят амплитуды пульсаций на Земле. Максимальные амплитуды на геостационарной орбите равны: на GOES-11 $A_{pc} = 3.8$ нТл, на GOES-12 $A_{pc} = 5.1$ нТл, на GOES-10 $A_{pc} = 6.8$ нТл. По данным наземных обсерваторий отфильтрованные максимальные полные амплитуды $A_{pc} = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ составили в DAWS 1.79 нТл, в FSIM 1.13 нТл, в FCHU 0.56 нТл. Этот факт подтверждает данные [Pilipenko et al., 2009; Пилипенко и др., 2012] о превышении интенсивности надъионосферных пульсаций над интенсивностью пульсаций, наблюдаемых на Земле.

5. Пространственные особенности генерации Pc1 на геостационарной орбите и на Земле в полуденном секторе

Теперь сместимся на меридиан 265° и сравним результаты наблюдения пульсаций на спутнике GOES-12 (MLT=13:30) и на станциях меридиана (MLT=11:42). В отличие от предыдущего случая, на рис. 7 видно существенное различие наземной и спутниковой картины колебаний. Прежде всего, на самой северной станции меридиана TALO ($\Phi = 69.54^\circ$) наблюдаются шумовые пульсации типа PiC. В обсерватории RANK ($\Phi = 62.82^\circ$) регистрируются всплески Pc1 в диапазоне периодов 1.6–2.5 с.

На станциях FCHU ($\Phi = 58.76^\circ$), GILL ($\Phi = 56.38^\circ$) и ISLL ($\Phi = 53.86^\circ$) в 18:18 UT возбуждаются интенсивные неструктурированные колебания Pc1 в двух интервалах периодов (1.25–1.8 и 2–5 с), модулированные по интенсивности, особенно в начале события (темные элементы в спектре). Но здесь, в отличие от спектров пульсаций на меридиане 238° , наклон переднего фронта пульсаций менее выражен. На GOES-12, который находился в рассматриваемый момент на $\sim 15^\circ$ восточнее наземной обсерватории, наблюдается всплеск колебаний Pc1 (начало в 18:22 UT) по времени существенно меньший (~ 16 мин), чем на наземных станциях. Среднее соотношение амплитуд пульсаций на геостационарной орбите и на Земле сохраняется и равно ~ 5 .

На самой южной станции PINA ($\Phi = 50.20^\circ$) меридиональной цепочки пульсации Pc1 отсутствуют, но наблюдаются шумовые пульсации. Не регистрируются Pc1 также западнее PINA на близких по широте станциях GULL ($\Phi = 50.6^\circ$) и MSTK ($\Phi = 53.35^\circ$). Не наблюдаются пульсации и в вечернем секторе на станциях финской меридиональной сети (~ 20 LT). Таким образом, неструктурированные пульсации Pc1 наблюдаются в широтном поясе $\Delta\Phi \sim 6^\circ$ с максимумом на широте 67.2° ($L = 6.66$), т. е. вблизи среднестатистического положения плазмопаузы при низком уровне магнитной активности.

Для определения положения плазмопаузы в зависимости от магнитной активности воспользуемся известной формулой $L = 6 - 0.6 \cdot K_p$ [Carpenter, Anderson, 1992]. В предшествующий SSC трехчасовой интервал $K_p = 0$. Следовательно, плазмопауза должна находиться на широте $\sim 6R_E$ (рис. 8).

Отметим еще две важные детали. Как видно на рис. 7, в южных обсерваториях начало пульсаций запаз-

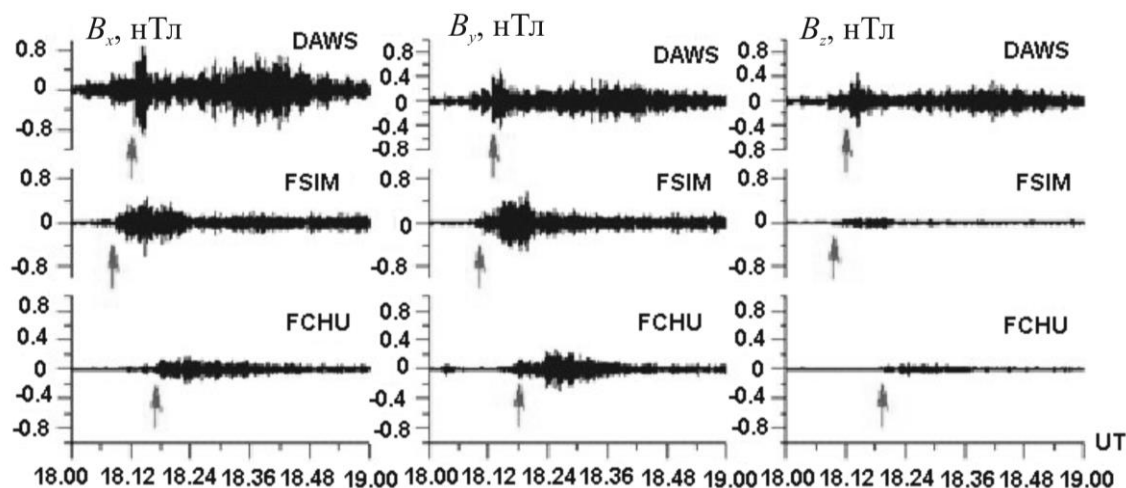


Рис. 6. Осциллограммы компонент пульсаций отфильтрованы в интервале периодов 1–4 с, полученные в трех отстоящих по долготе обсерваториях. Стрелкой отмечено начало фронта нарастания частоты. Время по оси абсцисс дано в часах и минутах.

дывает по отношению к началу пульсаций на северных станциях. Время запаздывания между RANK и ISLL составило ~ 8 мин, что совпадает со временем нарастания B_z -компоненты геомагнитного поля от невозмущенного до максимального значения на спутниках GOES-11 и -12. Вторая особенность – различие в ширине полосы частот, занимаемой пульсациями, на Земле и спутниках. Полоса частот Δf пульсаций, зарегистрированных на спутниках ($\Delta f_{G11}=0.14$ Гц, $\Delta f_{G12}=0.15$ Гц, $\Delta f_{G10}=0.17$ Гц), уже полосы частот пульсаций на Земле, особенно в околополуденные часы ($\Delta f_{GILL}=0.42$ Гц).

На спутнике GOES-10, находившемся в послеполуденном секторе (MLT ~ 14), в 18:26 UT зарегистрирован короткий, длительностью 8 мин, и наиболее интенсивный ($A_{\max} \sim 7$ нТл) из наблюдаемых на спутниках всплеск пульсаций Pc1 (рис. 9). Мы не располагаем данными обсерваторий, расположенных в этом долготном секторе. Однако, как мы уже упоминали, восточнее, в долготном секторе MLT=20 ч (финская меридиональная цепочка магнитометров), пульсации отсутствовали.

6. Долготное запаздывание начала пульсаций на геостационарных спутниках

На рис. 9 представлены полученные на трех геостационарных спутниках осциллограммы пульсаций, отфильтрованных в диапазоне периодов 2–5 с. Отчетливо видно запаздывание к востоку начала пульсаций. Время t_0 начала пульсаций, определенное на основе отфильтрованных данных, составляет: для GOES-11 18:09:44 UT, для GOES-12 18:20:56 UT, для GOES-10 18:25:28 UT.

Используя координаты спутников, представленные в табл. 1, определим время запаздывания Δt начала пульсаций на спутниках GOES-11 и -10 относительно GOES-12. Для GOES-11 и GOES-12 $\Delta t=11.2$ мин, а для GOES-12 и GOES-10 $\Delta t=4.5$ мин.

В предположении гладкого, т. е. непрерывного перемещения источника скорости дрейфа будут равны $V_{D1}=5.39$ °/мин и $V_{D2}=3.46$ °/мин соответственно. Возможно, различие дрейфовых скоростей

связано с тем, что точка контакта МУВ с магнитосферой находится между GOES-11 и -12, как показано на рис. 1, а.

7. Основные результаты наблюдений

1. Всплески неструктурированных Pc1-пульсаций, генерированные в результате взаимодействия МУВ с магнитосферой в утреннем секторе, сначала регистрируются в полосе частот 0.5–0.2 Гц, а затем полоса частот, занимаемая пульсациями, сужается до ~ 0.15 Гц. В первую очередь пульсации начинаются на спутнике GOES-11 (6.6 R_E , MLT=09:40 ч) и на станции утреннего сектора (FSIM, MLT=09:40 ч).

2. Режим пульсаций существенно отличается на геосинхронной орбите и на Земле по продолжительности, спектральным и амплитудным характеристикам. Максимальные амплитуды пульсаций, зарегистрированных на спутниках, равны: на GOES-11 – $A_{pc}=3.8$ нТл, на GOES-12 – $A_{pc}=5.1$ нТл, на GOES-10 – $A_{pc}=6.8$ нТл. По данным наземных обсерваторий отфильтрованные максимальные полные амплитуды $A_{pc}=(x^2+y^2+z^2)^{1/2}$ равны: в DAWS – 1.79 нТл, в FSIM – 1.13 нТл, в FCHU – 0.56 нТл.

3. Начало возбуждения пульсаций на геостационарной орбите смещается на восток от спутника к спутнику (рис. 9, а). На Земле наблюдается запаздывание возбуждения пульсаций вдоль параллели на западной и восточной станциях относительно обсерватории FSIM соответственно на $\Delta t=190$ и 440 с. Вдоль меридиана на расстоянии $\Delta\Phi=9^\circ$ наблюдается запаздывание начала пульсаций в самой южной обсерватории ISLL по отношению к самой северной RANK на $\Delta t=420$ с.

4. Если считать, что спутник пересекает область усиления волновой активности со скоростью движения 3.07 км/с, то размеры области усиления активности пульсаций будут для GOES-11 ~ 2500 км, для GOES-12 ~ 3000 км, для GOES-10 ~ 1500 км.

8. Обсуждение результатов

Часть полученных нами результатов подтверждает выводы, сделанные другими авторами

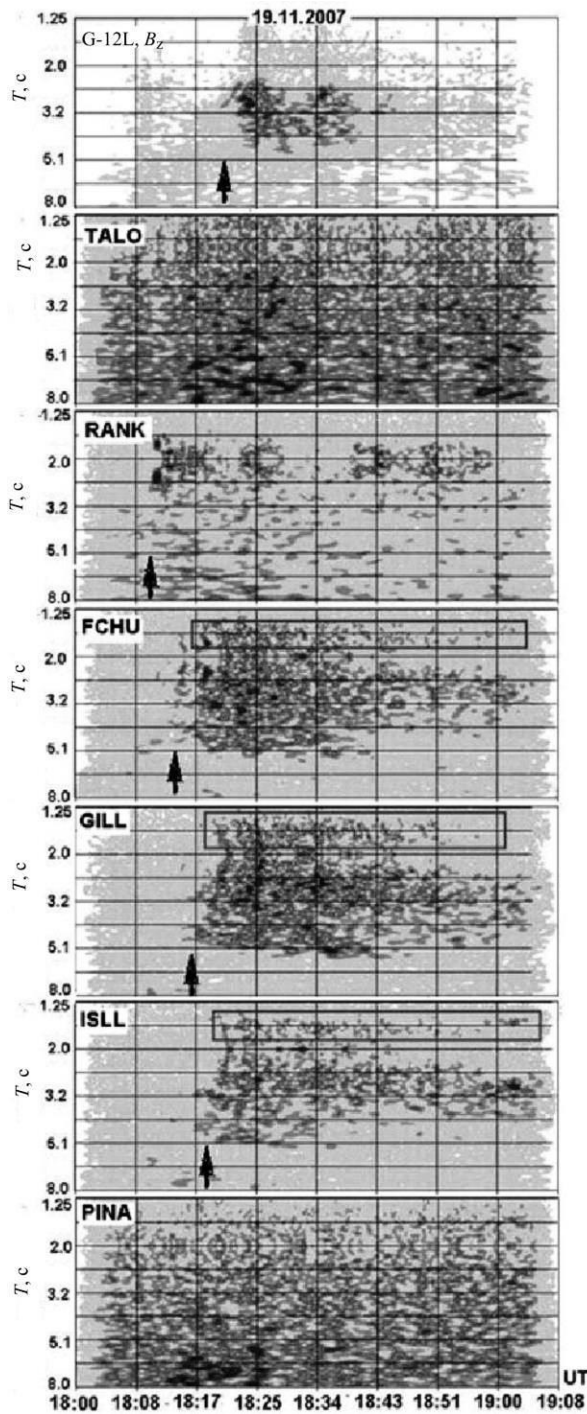


Рис. 7. Динамические спектры пульсаций, полученные по данным спутника GOES-12 и наземных обсерваторий вдоль меридиана 265°. Стрелками обозначено начало генерации Pc1. Прямоугольником обозначен диапазон периодов 1.25÷1.8 с.

по данным других спутников. В частности, подтверждается факт превышения амплитуд надбюносферных пульсаций над амплитудами пульсаций, наблюдаемых на поверхности Земли [Pilipenko et al., 2009; Пилипенко и др., 2012].

Что касается перемещения на восток начала Pc1 на разных геостационарных спутниках, его можно интерпретировать как движение на восток источника, вызывающего возбуждение пульсаций. Этот наблюдательный факт позволяет интерпретировать обнаруженный восточный дрейф пульсаций Pc1 в рамках трех гипотез.

1. Направление дрейфа может указывать на тип заряженных частиц, с которыми связано возбуждение в магнитосфере циклотронной неустойчивости, приводящей к генерации МГД-волн. Хорошо известно, что после инъекции заряженных частиц во время геомагнитных возмущений протоны дрейфуют на запад, а электроны на восток. В рамках дрейфовой модели можно оценить энергию частиц по наблюдаемым временам запаздывания начала возбуждения пульсаций на разных долготах [Гульельми, Троицкая, 1973]. Если для расчета взять формулу скорости азимутального дрейфа частиц с малыми питч-углами в поле геомагнитного диполя $V_D = 6 \cdot 10^3 L \epsilon$, то по приведенным выше временам запаздывания получим следующие значения энергий дрейфующих электронов:

$$\epsilon_1(G11 \div G12) = 135.7 \text{ кэВ},$$

$$\epsilon_2(G12 \div G10) = 87.2 \text{ кэВ}.$$

Заметим, что значение ϵ_1 может быть завышено из-за неопределенности направления дрейфа между G11 и G12, поэтому наиболее вероятным следует считать значение ϵ_2 .

Однако эту гипотезу следует отвергнуть по следующим причинам. Во-первых, все известные сегодня механизмы возбуждения пульсаций Pc1 рассматриваемого диапазона связывают их генерацию с протонной циклотронной неустойчивостью. Частота циклотронной неустойчивости электронной ветви на три порядка выше. Во-вторых, во время рассматриваемого события мы не нашли информации о наблюдении потоков электронов в таком энергетическом диапазоне. Кроме того, мы не имеем возможности точно определить тип генерированной МГД-волны и, соответственно, вид неустойчивости.

2. Дрейф источника пульсаций на восток можно интерпретировать также в рамках модели генерации и распространения пульсаций в магнитосферных дактах. Дакты – вытянутые вдоль силовых линий области холодной плазмы, оторвавшиеся от плазмосферы и дрейфующие на восток [Buzevich et al., 1987]. Предполагается, что генерация Pc1 может быть связана с циклотронной неустойчивостью

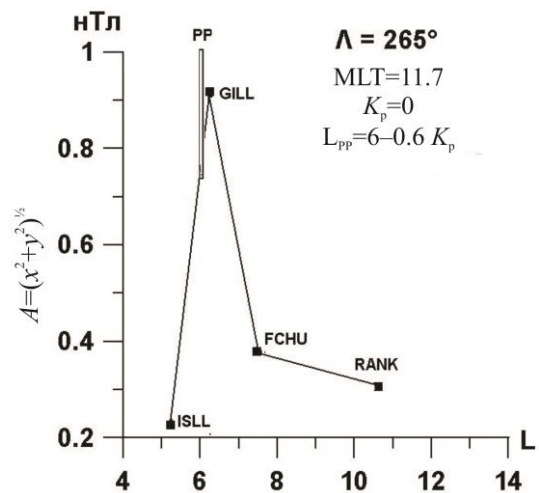


Рис. 8. Широтный ход отфильтрованной амплитуды Pc1 вдоль меридиана 265°. Прямоугольником обозначено среднестатистическое положение плазмопаузы в спокойной геомагнитной обстановке $K_p=0$.

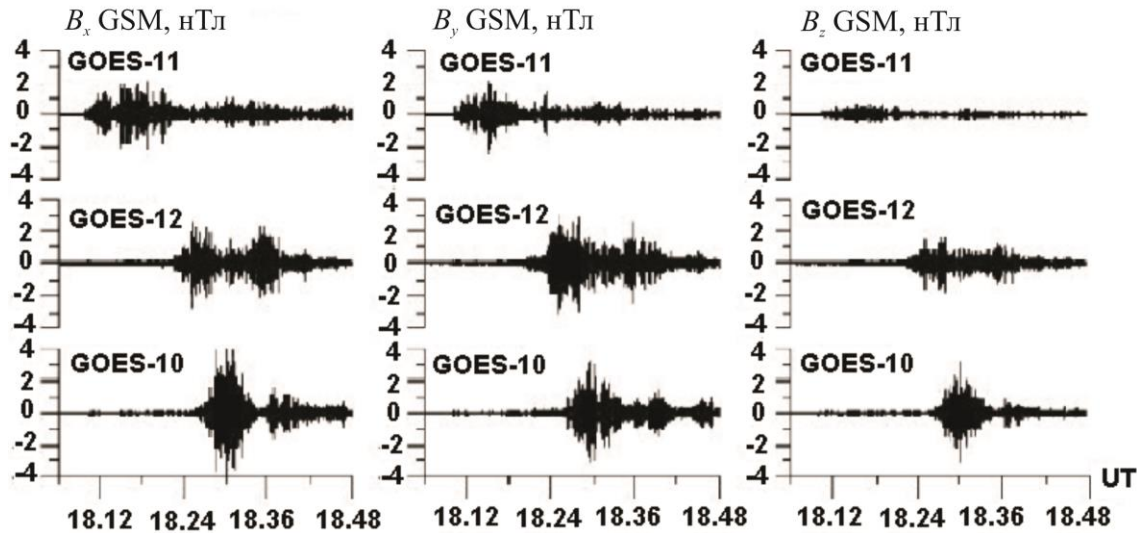


Рис. 9. Осциллограммы трех компонент пульсаций, отфильтрованных в диапазоне периодов 1–4 с, на геостационарных спутниках. Время по оси абсцисс дано в часах и минутах.

протонов с $\epsilon \sim 50$ кэВ, дрейфующих на дневную сторону и взаимодействующих с дактами, содержащими холодную плазмосферную плазму. Пространственные размеры области наблюдения Pc1 на геостационарных спутниках ($\leq 2 R_E$) укладываются в размеры дактов, определяемые по другим данным [Spasojević et al., 2003; Chappell, 1974]. Механизм локализации и распространения пульсаций в магнитосферных дактах рассмотрен в [Buzevich et al., 1987]. Однако приводимые выше данные наблюдений противоречат этой модели. Согласно [Spasojević et al., 2003; Chappell, 1974] облака холодной плазмы отрываются от вечернего выступа плазмосферы и конвекцией сносятся на полуденную сторону. Однако в рассмотренном событии явления развиваются на утренней и предполуденной стороне, что противоречит модели генерации и распространения наблюдаемых пульсаций в магнитосферных дактах.

3. Завершая обсуждение полученных результатов, подчеркнем трудности интерпретации восточного дрейфа источника Pc1 и обратимся к третьей гипотезе. В рассмотренном нами событии важны два момента.

Прежде всего, эмпирические модели положения плазмопаузы [Кринберг, Тащилин, 1984; Spasojević et al., 2003; Carpenter, Anderson, 1992] показывают, что плазмосфера быстро сжимается в период усиленной геомагнитной активности и медленно расширяется в спокойных магнитных условиях. В длительные периоды отсутствия магнитных возмущений плазмосфера может «распухать» и плазмопауза может смещаться на высокие L-оболочки [Spasojević et al., 2003; Carpenter, Anderson, 1992]. Действительно, за предшествующий дню наблюдений двухнедельный период средний индекс магнитной возмущенности составил $\Sigma K_p \sim 9.15 \pm 6.31$, поэтому можно предположить, что плазмопауза находилась вблизи магнитопаузы. Это косвенно подтверждается широтным распределением амплитуды пульсаций. Видно (рис. 6, 8, 9), что пульсации начинают регистрироваться на $L=10.89$, а максимум их широтного

распределения находится вне статистического положения плазмопаузы при $K_p=0$.

Вторым важным моментом является смещение начала возбуждения пульсаций к западу и востоку от обсерватории, в которой наблюдается первичный контакт МУВ с магнитопаузой, определяемый на спектрограммах геомагнитных пульсаций по началу Pc1 с резким передним фронтом. Этот факт можно интерпретировать в рамках модели возбуждения и распространения поверхностной волны по магнитопаузе [Нишида, 1980; Мишин и др., 2013]. Смещение магнитопаузы приводит к возникновению поверхностной волны. Можно предположить, что инжектированные во время SSC горячие частицы взаимодействуют с холодной плазмосферной плазмой, граница которой в рассматриваемый день находится вблизи магнитопаузы. Это взаимодействие приводит к нарастанию ионно-циклотронной неустойчивости и генерации Pc1. Поверхностная волна, вызывая модуляцию энергичных частиц внутри магнитосферы, создает условия для развития ионно-циклотронной неустойчивости и может вызвать наблюдаемые явления дрейфа и модуляции источника Pc1. Кроме того, плазмопауза может иметь выступы [Spasojević et al., 2003], ширина которых определяется временем наблюдения Pc1 на геостационарных спутниках. Плазмопауза отделяет магнитосферную плазму, участвующую в конвективном движении, от плазмы, вращающейся вместе с Землей. Поскольку Земля вращается с запада на восток, то и плазмосферная плазма движется на восток. Кажущееся перемещение источника на восток может быть связано с коротирующим движением холодной плазмы и, соответственно, с запаздыванием начала пульсаций на восточных станциях.

Таким образом, движение поверхностной волны одновременно со смещением магнитопаузы вызывает изменение условий развития ионно-циклотронной неустойчивости и в то же время изменяет гиро-частоту ионов, что отражается в резком усилении активности пульсаций Pc1 и нарастании частоты

пульсаций на переднем фронте. Однако для подтверждения или для опровержений высказанных предположений требуется более тщательный анализ.

Заключение

По своим пространственным особенностям одновременно наблюдаемые на Земле и на геостационарной орбите неструктурированные геомагнитные пульсации Pc1 ($T \sim 0.2-5$ с) существенно отличаются от структурированных Pc1 (жемчужин), исследованных по наблюдениям в той же области магнитосферы, возбуждение которых также связано с резким сжатием магнитосферы [Usanova et al., 2008].

Важным результатом нашего исследования является обнаружение смещения начала возбуждения пульсаций к западу и востоку от станции, на которой наблюдается первичный контакт МУВ с магнитопаузой, определяемый на спектрограммах геомагнитных пульсаций по началу Pc1 с резким передним фронтом. Вторым важным, на наш взгляд, результатом является выявление смещения на восток от спутника к спутнику начала возбуждения пульсаций на геостационарной орбите.

Таким образом, одновременные наземно-спутниковые наблюдения подтверждают определенное по наземным наблюдениям различие свойств структурированных (жемчужин) и неструктурированных Pc1, что указывает на различные механизмы их генерации.

Авторы благодарят Мишина В.В. за полезные обсуждения. Авторы выражают также признательность NASA CDAWEB за возможность использования данных о параметрах плазмы и магнитного поля, измеренных на спутниках Wind, Geotail, и Howard J. Singer за возможность использования данных магнитометров геостационарных спутников GOES-10, -11, -12. Авторы благодарны J. Mann, D.K. Milling и членам команды за геомагнитные данные сетей CARISMA и CANOPUS, а также обладателям информации за возможность использования данных мировой сети Kyoto World Data Center for Geomagnetism и сети INTERMAGNET.

Работа поддержана грантами РФФИ № 10-02-01063, 12-05-00121-а, 13-05-00529.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гульельми А.В. Циклотронная неустойчивость протонов внешнего радиационного пояса // Геомагнетизм и аэрономия. 1968. Т. 8, № 3. С. 412–419.

Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 206 с.

Кринберг И.А., Ташилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.

Мишин В.В., Клибанова Ю.Ю., Цэгмэд Б. Влияние наклона фронта неоднородности солнечного ветра на свойства вызванных им длиннопериодных геомагнитных пульсаций // Космические исследования. 2013. Т. 51, № 2. С. 107–118.

Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 176 с.

Пархомов В.А., Рахматулин Р.А. О двух типах пульсаций в диапазоне Pc1 // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1979. Вып. 46. С. 82–88.

Пилипенко В.А., Полозова Т.Л., Энгебретсон М. Пространственно-временная структура ионно-циклотронных волн в верхней ионосфере по наблюдениям на спутниках ST-5 // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 5. С. 355–365.

Троицкая В.А., Иванов К.Г., Калишер А.Л., Довбня Б.В. Дневная магнитопауза и ее окрестности как источник геомагнитных пульсаций в диапазоне Pc1 // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т. 19, № 4. С. 657–662.

Buzevich A.V., Leonovich A.S., Parkhomov V.A. Geomagnetic pulsations associated with MHD waveguide // Planet. Space Sci. 1987. V. 9. P. 1093–1100.

Chappell C.R. Detached plasma regions in the magnetosphere // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1974. V. 79, iss. 13. P. 1861–1870. doi: 10.1029/JA079i013p01861.

Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 1097.

Curto J.J., Araki T., Alberca L.F. Evolution of the concept of sudden storm commencements and their operative identification // Earth Planets Space. 2007. V. 59, N 11. P. i–xii.

Kangas J., Guglielmi A.V., Pokhotelov O.V. Morphology and physics of short-period geomagnetic pulsations // Space Sci. Rev. 1998. V. 83. P. 435–512.

Mann I. R., Milling D.K., Rae I.J., et al. The upgraded CARISMA magnetometer array in the THEMIS era // Ibid. 2008. V. 141. P. 413–451. doi:10.1007/s11214-008-9457-6.

Marmet P. New digital filter for analysis of experimental data // Rev. Sci. Instrum. 1979. V. 50, N 1. P. 79–83.

Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Shiokawa K., Engebretson M.J. Transmission of ULF Pc1 waves through the topside ionosphere to the ground // Proc. ESA. 2009. www.congex.nl/S4-P01.

Spasojević M., Goldstein J., Carpenter D.L., et al. Global response of the plasmasphere to a geomagnetic disturbance // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A9. P. 1340. doi:10.1029/2003JA009987.

Usanova M.E., Mann I.R., Rae I.J., et al. Multipoint observations of magnetospheric compression-related EMIC Pc1 waves by THEMIS and CARISMA // J. Geophys. Res. 2008. V. 35. L17S25. doi:10.1029/2008GL034458.

http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/.

<http://129.128.234.110:8080/ssdp/jsp/login.jsp>.

¹Байкальский государственный университет экономики и права, Иркутск, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

³Исследовательский центр астрономии и геофизики АН Монголии, Улан-Батор, Монголия

⁴Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобелыцина МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Institute of Space Sciences, National Central University, Chung-Li, Taiwan