

УДК 550.384.4

ПУЛЬСАЦИИ ГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА ФАЗЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 7–8.09.2017 г. И СВЯЗЬ ИХ ДИНАМИКИ С ИЗМЕНЕНИЯМИ ПАРАМЕТРОВ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

© 2019 г. В. В. Сафаргалеев^{1, *}, П. Е. Терещенко^{1, 2}

¹Полярный геофизический институт (ПГИ),
г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

²С.-Петербургский филиал института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН),
г. С.-Петербург, Россия

*e-mail: Vladimir.safargaleev@pgia.ru

Поступила в редакцию 28.06.2018 г.

После доработки 28.09.2018 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

Форма и динамика необычного возмущения в диапазоне геомагнитных пульсаций $Pc1$, зарегистрированного наземными индукционными магнитометрами в предутренние часы (03–06 MLT) 11 сентября 2017 г. на поздней фазе восстановления сильной магнитной бури, проанализированы в контексте изменений параметров межпланетной среды. Пульсации наблюдались в авроральной и субавроральной зонах, а также в средних широтах, и имели сложную структуру в виде мультиплетных “жемчужин” (диапазон частот 1–1.5 Гц) и двух серий узкополосных всплесков (диапазон частот 2–3 Гц) с периодом следования ~5 и ~20 мин. Пульсации в виде серии всплесков являются редким событием и регистрируются преимущественно в дневные часы. Сопоставление динамики пульсаций $Pc1$ с параметрами межпланетной среды проводилось с использованием данных спутников DSCOVR и THEMIS. Изменение несущей частоты и интенсивности мультиплетных жемчужин явилось откликом на скачок плотности плазмы солнечного ветра. Серия всплесков с периодом следования ~5 мин могла быть инициирована одновременным усилением скорости солнечного ветра и Vu -компоненты межпланетного магнитного поля, наблюдавшимся спустя ~40 мин после скачка плотности. Всплески с периодом следования ~20 мин мы связываем либо с откликом магнитосферы на кратковременный экскурс дневной магнитопаузы к Земле, либо с колебаниями близкого периода в переходной области перед фронтом возмущения плотности. Получены оценки частоты, периода следования и амплитуды пульсаций.

DOI: 10.1134/S001679401903012X

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из подходов к исследованию влияния межпланетной среды на космическую погоду является анализ реакции магнитосферы на контакт с неоднородностью солнечного ветра. Внезапное импульсное изменение динамического давления солнечного ветра (далее для краткости будем использовать аббревиатуру SI, sudden impulse) облегчает, в этом случае, задачу ассоциации магнитосферных возмущений с возмущениями в межпланетной среде, поскольку позволяет достаточно надежно определить момент воздействия на магнитосферу. Отклик магнитосферы на SI многообразен. В рамках данного исследования мы ограничимся откликом геомагнитного поля в частотном диапазоне 0.1–5 Гц (пульсации $Pc1$). Статистический пик в распределении повторяемости пульсаций лежит в интервале 0.5–1 Гц

[Park et al., 2013], а наиболее благоприятной для генерации $Pc1$ оказывается поздняя фаза восстановления магнитной бури [Wentworth, 1964].

Во время восстановительной фазы, перемещение перемещающейся от Земли плазмопаузы с “остатками” кольцевого тока создает условия для возбуждения ионно-циклотронной неустойчивости плазмы. В результате развития этой неустойчивости в экваториальной плоскости на расстояниях 3–5 земных радиусов генерируются электромагнитные ионно-циклотронные волны с частотой, определяемой гирочастотой протонов в вершине силовой линии. Распространяясь вдоль силовой линии в ионосферу, а затем — в ионосферном волновом канале, эти волны регистрируются на поверхности Земли как пульсации $Pc1$. Развитие неустойчивости может начаться как спонтанно, так и в результате внешнего воздей-

ствия. Со спонтанным развитием ионно-циклотронной неустойчивости чаще всего связывают наиболее распространенный подкласс $Pc1$ в виде квазисинусоидальных колебаний с модуляцией амплитуды в виде отдельных волновых пакетов — “жемчужин”. Волновая активность в виде жемчужин может длиться часами и иметь форму мультиплетов. Внешним воздействием, в частности, может быть локальное сжатие магнитных силовых трубок распространяющимся в магнитосфере фронтом магнитозвукового импульса [Olson and Lee, 1983], генерируемого во время SI. Отметим, что некоторые авторы усиление и даже запуск жемчужин тоже связывают со сжатием магнитосферы солнечным ветром [Anderson and Hamilton, 1993; Usanova et al., 2010].

Исследование морфологии короткопериодных пульсаций, индуцируемых быстрым изменением динамического давления солнечного ветра, началось более пятидесяти лет назад [Troitskaya, 1961; Tepley and Wentworth, 1962]. Тем не менее, судя по небольшому количеству публикаций, этот подкласс пульсаций исследован еще недостаточно. Причиной является, по-видимому, спорадичность их появления. Пульсации наблюдаются в 20% случаев SI и преимущественно вблизи полуденного меридиана [Tepley and Wentworth, 1962; Kangas et al., 1998; Safargaleev et al., 2002]. Пульсации имеют форму кратковременного одиночного всплеска, за которым в ряде случаев следует серия более длительных, но менее интенсивных всплесков [Kangas et al., 1986]. Иногда первый ярко выраженный всплеск может отсутствовать, а серия всплесков запаздывать относительно момента SI на несколько десятков минут, что может свидетельствовать о разных механизмах генерации этих двух видов геомагнитного отклика на внезапное сжатие магнитосферы [Сафаргалеев и др., 2003]. Согласно [Safargaleev et al., 2002], несущая частота серии всплесков немного выше типичной частоты жемчужин и от события к событию варьируется от 0.7 до 2.6 Гц, составляя в среднем ~ 1.6 Гц. Ширина полосы, в которой наблюдаются всплески, $\Delta f \sim 0.5$ Гц, типичное значение периода следования ~ 15 мин. Если источник жемчужин находится, вероятнее всего, вблизи плазмосферы, то источник пульсаций, инициированных быстрым сжатием магнитосферы, исследователи помещают вблизи дневной магнитопаузы. Далее для удобства изложения мы будем использовать термины “пульсации $Psi1$ ” или “ULF-активность” по отношению к этому виду отклика магнитосферы на скачок давления плазмы солнечного ветра. Отметим, что сжатие магнитосферы влияет также и на режим $Pc1$ типа “жемчужин”, если они наблюдались до SI. А именно, сжатие приводит к интенсификации жемчужин и небольшому увеличению несущей частоты [Kangas et al., 1998; Safargaleev et al., 2002].

Наиболее интригующей особенностью $Psi1$ является относительно стабильные несущая частота и период следования всплесков на протяжении всей серии, длящейся в отдельных событиях 1.5–2 ч [Safargaleev et al., 2002]. Периодичность объясняется модуляцией инкремента нарастания ионно-циклотронной неустойчивости резонансными магнитозвуковыми колебаниями типа 10–15 минутных колебаний, теоретически предсказанных Данжи [Dungey, 1963]. При этом признаки модулирующего возмущения в наземных данных не обнаруживаются. В качестве возможных причин авторы указывают большое азимутальное волновое число резонансных колебаний [Wright and Yeoman, 1999] или то, что отражение модулирующей волны происходит выше ионосферы [Сафаргалеев и Мальцев, 1986]. Отметим, что в последнем случае омические потери в ионосфере минимальны, и колебания не затухают в течение длительного промежутка времени.

В данной работе исследуется геомагнитная активность в герцовом диапазоне, зарегистрированная на поздней стадии фазы восстановления магнитной бури и имеющая форму жемчужин и серии более высокочастотных всплесков. Необычность явления состоит в том, что серия всплесков наблюдается в ранние утренние часы, что не укладывается в рамки предыдущих исследований этого явления. Задача работы состоит в выявлении связи динамических режимов наблюдаемых пульсаций с изменениями параметров межпланетной среды.

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

С целью уменьшения влияния техногенных шумов, Полярный геофизический институт проводит измерения вариаций геомагнитного поля в исследуемом частотном диапазоне вдали от крупных промышленных и населенных центров, в обс. ПГИ Верхнетуломская, TUL (68.6° N, 31.7° E, $L \sim 5.5$), расположенной в авроральной зоне и субавроральной обс. ИЗМИРАН Красное озеро, SPG (60.5° N, 29.7° E, $L \sim 3.5$). Для уменьшения акустического шума датчики закопаны в землю. Низкочастотная вибрация минимизирована расположением зоны наблюдений вдали от деревьев и водоемов. Измерение компонент электромагнитного поля в пунктах приема производится калиброванными в диапазоне 0.1–240 Гц регистраторами с привязкой к времени GPS [Лебедь и др., 2012]. Регистраторы разработаны и сконструированы в ПГИ.

Для непосредственной регистрации магнитного поля использовались три ортогональных индукционных датчика, спектральная плотность собственного шума которых была не более $100 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$ на частоте 1 Гц и не более $10 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$ на частоте 10 Гц. Сигналы подавались на 24-бит-

ный АЦП, данные с которого синхронизировались с временными метками GPS с точностью не хуже 5 мкс. Амплитудно-частотные характеристики индукционных датчиков были экспериментально получены прямыми измерениями в диапазоне 0.01–100 Гц и учитывались при спектральной обработке сигнала для перевода единиц АЦП в микроамперы. Данная процедура позволяет корректно провести сравнительный анализ интенсивности пульсаций, регистрируемых в различных местах (авроральная зона, TUL, и средние широты, SPG) и в различных частотных диапазонах (в данном случае 1–2 Гц, где наблюдались жемчужины, и 2–3 Гц, где наблюдались серии всплесков).

Выделение пульсаций $Pc1$ из шумового фона осуществлялось по динамическим спектрам (сонограммам). Для этого временной интервал длительностью один час (при дискретизации сигнала 40 Гц это 144000 отсчетов) разбивался на участки “длиной” 1024 отсчета с перекрытием 100 отсчетов. На каждом участке рассчитывался спектр методом БПФ. Окно, “сглаживающее” искажения за счет конечности интервала, устанавливалось прямоугольным. Из временной последовательности спектров формировалась матрица, для визуализации которой использовался пакет MATLAB. Пакет позволяет “раскрашивать” матрицу, приписывая каждому из ее элементов соответствующий оттенок серого. Наиболее интенсивному сигналу соответствует наиболее темный участок сонограммы. Данный способ более информативен, чем, например, построение контуров равной интенсивности с заливкой цветом области между ними.

Для иллюстрации некоторых особенностей геомагнитной активности в диапазоне 0.1–5 Гц (далее для краткости НЧ-активности), на определенном временном промежутке рассчитывались спектральная интенсивность сигнала и его среднее амплитудное (по модулю) значение. Расчет спектральной интенсивности проводился по методу Велча (Welch) при помощи встроенной в пакет MATLAB процедуры *sptool* со следующими параметрами: длина интервала, на котором делалось БПФ – 1024 отсчета, сглаживающее окно – Хемминга (Hamming), перекрытия интервалов не было. Применение калиброванной аппаратуры позволило рассчитать среднее амплитудное значение сигнала в физических единицах (мкА/м). Перед расчетом исходный сигнал пропусклся через фильтр, отсекающий колебания с частотой ниже 0.8 Гц, поскольку интенсивность шума в этом диапазоне сравнима с интенсивностью пульсаций $Pc1$, наблюдаемых в полосе 1–3 Гц.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Геофизическая обстановка и особенности формы магнитной активности в герцовом диапазоне

Рассматриваемое явление имело место в интервале с 00–06 UT 11 сентября 2017 г., на восстановительной фазе магнитной бури интенсивностью ~100 нТл, начавшейся тремя сутками раньше. Интервал характеризуется умеренной геомагнитной активностью: $Dst < 30$ нТл, трехчасовой Kp -индекс ~3 (нижняя панель на рис. 1а). Мониторинг состояния межпланетной среды осуществлялся спутником DSCOVR (Deep Space Climate Observatory), находящемся на значительном удалении от дневной магнитопаузы ($X_{GSE} \sim 240 R_E$, $Y_{GSE} \sim -40 R_E$). Спутник был запущен NOAA в феврале 2015 г с целью заменить в перспективе спутник ACE (детали миссии DISCOVER – на сайте проекта <https://www.nesdis.noaa.gov/content/dscovr-deep-space-climate-observatory>). Измеренные спутником вариации параметров солнечного ветра представлены в верхней части рис. 1а. Время распространения неоднородности солнечного ветра от спутника до магнитосферы составляло в этом случае порядка часа, поэтому начало пульсаций в полосе 2–3 Гц, представленных на сонограмме на рис. 1б, логично связать с быстрым увеличением концентрации плазмы солнечного ветра, имевшим место в ~23:30 UT 10 сентября (вторая панель сверху на рис. 1а). С этой точки зрения пульсации можно рассматривать как стимулированные резким сжатием магнитосферы (пульсации $Ps1$, которые упоминаются в конце раздела 1), но зарегистрированные в ночные часы. Ниже, в разделе 3.2, мы продемонстрируем признаки сжатия магнитосферы в данных спутников THEMIS, находящихся вблизи подсолнечной точки по разные стороны магнитопаузы (рис. 1в), а также в данных низкоширотных магнитных станций.

Анализ сонограмм за исследуемый интервал показал, что $Pc1$ пульсации можно разделить на три группы (рис. 2). К группе Р мы отнесли классические жемчужины, начавшиеся примерно за два часа до более интенсивных серий всплесков А и В. Скачок концентрации на спутнике DSCOVR был зарегистрирован примерно в это же время, поэтому запуск жемчужин нельзя связать с SI. Серия всплесков А характеризуется периодом следования ~5–7 мин и несущей частотой если и меняющейся во времени, то незначительно. Серия всплесков В имеет больший период следования, 20–25 мин, а несущая частота очевидно уменьшается. Серия А напоминает дневные $Ps1$ из работы [Safargaleev et al., 2002], но с меньшим периодом следования. Упоминаний в литературе пульсаций в виде серии всплесков с убывающей несущей частотой и периодом следования 20–25 мин (серия В на рис. 2) нам обнаружить не удалось.

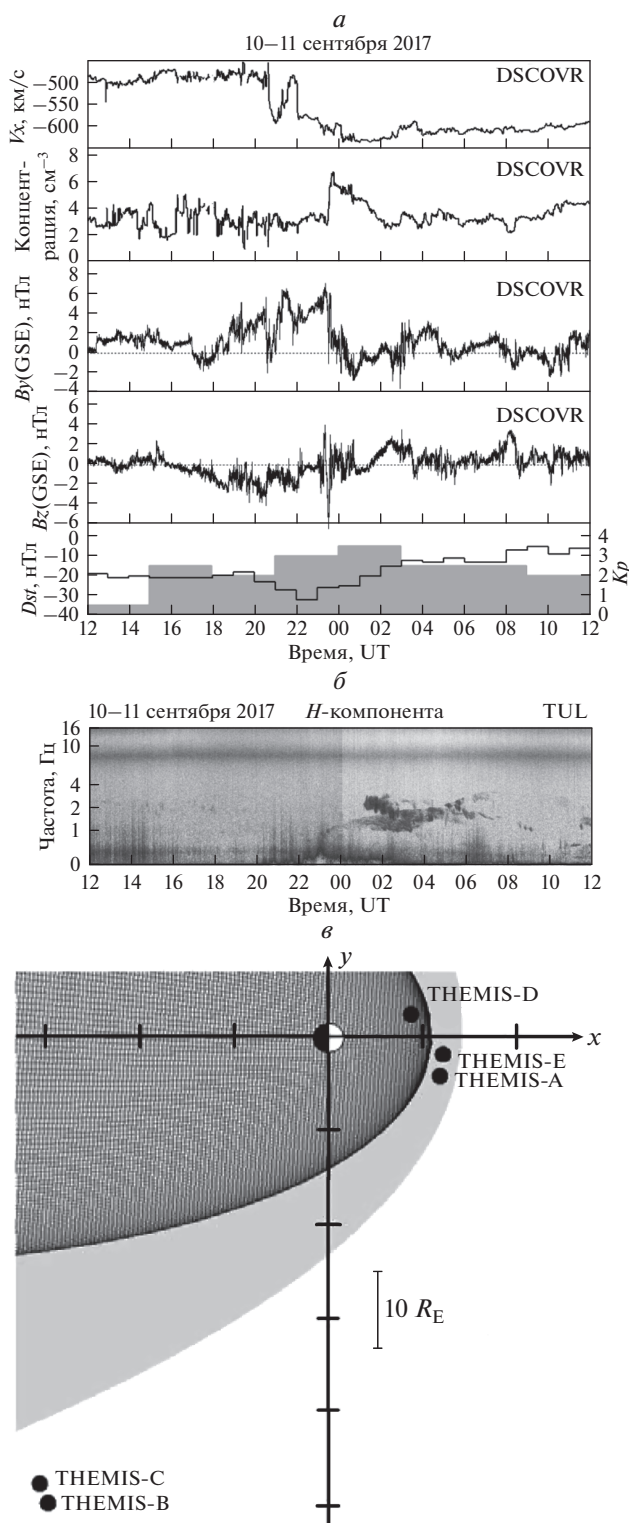


Рис. 1. (а) — ситуация в солнечном ветре, Dst вариация и K_p -индекс (серая заливка) в конце восстановительной фазы магнитной бури 7–8.09.2017 г.; (б) — форма и динамика геомагнитных пульсаций диапазона $Pc1$ в авральной зоне; (в) — примерное положение спутников THEMIS в момент активизации пульсаций $Pc1$.

Ниже в разделах 3.2–3.4 мы представим результаты совместного анализа наземных и спутниковых данных. Возможная теоретическая интерпретация будет дана в разделе 4.2.

3.2. Отклик $Pc1$ типа “жемчужины” на быстрое увеличение плотности плазмы солнечного ветра

На рисунке 3 приводятся данные, из которых следует, что в интервале 00:17–00:24 UT спутник THEMIS D, находящийся до этого внутри магнитосферы вблизи подсолнечной точки, оказался в переходной области между магнитопаузой и фронтом ударной волны. Это утверждение основано на резком ослаблении B_z -компоненты геомагнитного поля с вариациями в начале и конце интервала (верхняя панель на рис. 3), форма которых, а именно, быстрая смена знака, указывает на пересечение спутником азимутального токового слоя, которым может быть DCF-ток на магнитопаузе. На следующих двух панелях представлены характеристики потока энергичных ионов в переходной области, где все это время находился спутник THEMIS A, и на спутнике THEMIS D. В переходной области, на протяжении всего интервала наблюдается поток ионов с энергиями 1–2 кэВ. Частицы этих же энергий появляются в данных спутника THEMIS D в интервале, когда B_z -компонента варьируется около нулевых значений. Примечательно, что при этом существенно ослабевает поток частиц с энергиями >10 кэВ, которые мы ассоциируем с внутримagnetосферной плазмой. Изменение энергии частиц на спутнике THEMIS D свидетельствует в пользу предположения о выходе спутника из магнитосферы в переходную область.

Еще одно подтверждение гипотезы о попадании этого спутника в переходную область дает сравнительный анализ сонограмм (две нижние панели). Незадолго до резкого ослабления B_z , спутник THEMIS A регистрирует усиление волновой активности в частотном диапазоне <10 Гц. В это же время ослабевает поток протонов, что можно интерпретировать как попадание THEMIS A в примыкающую к магнитопаузе область пониженной концентрации плазмы (*plasma depletion layer* или магнитный барьер), “заполненной” низкочастотной волновой активностью [Anderson and Fuselier, 1993]. После резкого уменьшения B_z низкочастотные волны появляются в данных спутника THEMIS D.

Попадание THEMIS D из магнитосферы в переходную область могло произойти из-за поджатия дневной магнитосферы неоднородностью солнечного ветра, на фронте которой быстро увеличивается концентрации плазмы (рис. 4а). На земной поверхности поджатие сопровождается ступенеобразным увеличением H -компоненты геомагнитного поля на низкоширотных стаци-

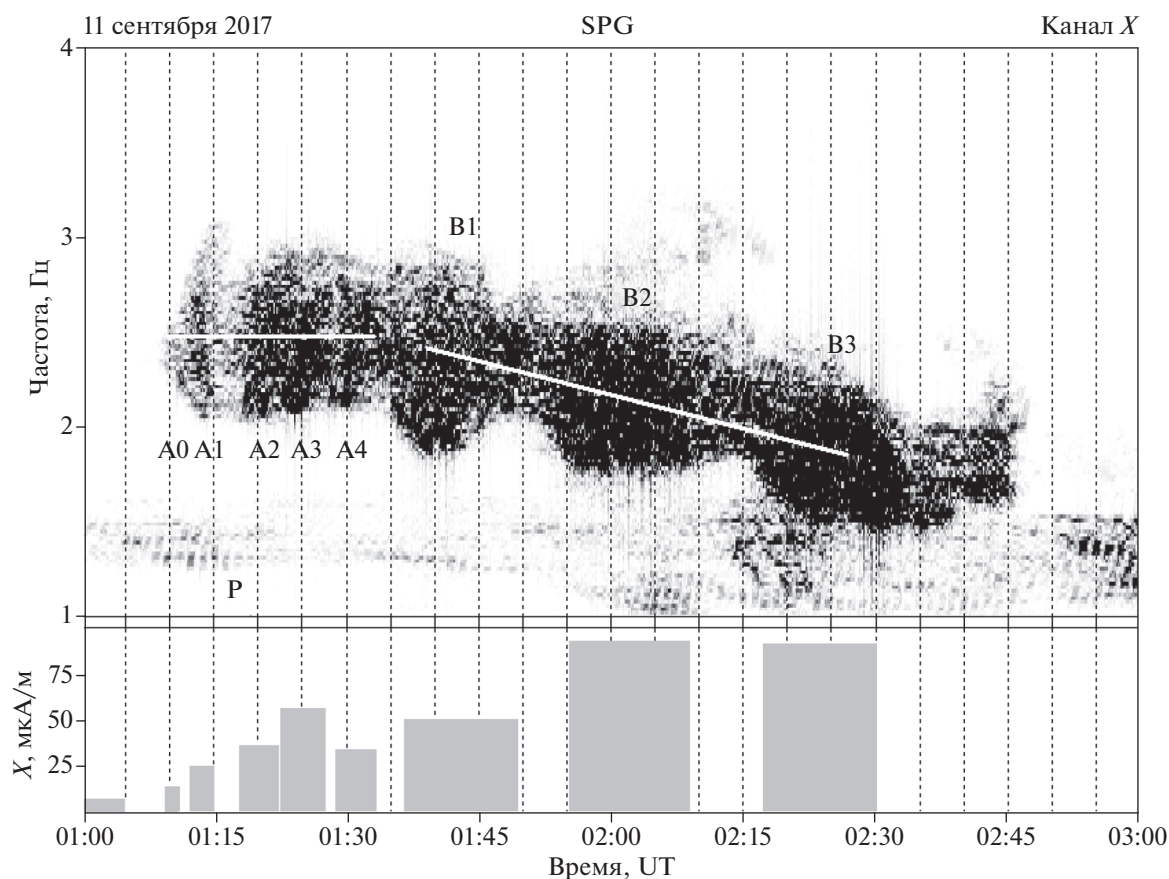


Рис. 2. Три формы активности в герцовом диапазоне на субавроральной станции: серия всплесков с постоянной (режим А) и убывающей несущей частотой (режим В); пульсации типа мультиплетных жемчужин (режим Р). Изменения несущей частоты схематично показаны белыми линиями. Серыми прямоугольниками показаны средние значения амплитуды пульсаций в соответствующем основании прямоугольника интервале.

ях. На рис. 4б это демонстрируется магнитограммами обсерваторий Гонолулу, HON (21.32° N, 158.0° W), расположенной в дневном секторе, и Алибаг, ABG (18.64° N, 72.87° E) в ночном секторе. Начало возмущения на обеих станциях совпадает с моментом прохождения магнитопаузы через орбиту спутника THEMIS D. Форма вариаций разная, что, вероятно, обусловлено дополнительным вкладом в ночную вариацию токов магнитосферного хвоста [Арыков и др., 1996].

Задержка описанных выше возмущений на спутнике THEMIS D относительно ступенеобразного увеличения концентрации плазмы солнечного ветра на спутнике DSCOVR составляет примерно 45–50 мин. Поскольку THEMIS D находился вблизи дневной магнитопаузы (рис. 1б), можно это время считать приблизительно временем распространения возмущения в солнечном ветре от спутника до магнитосферы, не прибегая к расчетам. Эту оценку мы используем ниже при поиске вероятной причины серии всплесков А.

Реакция $Pc1$ типа жемчужин на сжатие магнитосферы демонстрируется сонограммами на

верхних панелях рис. 4б. На сонограмме с большим временным разрешением видно, что изменение несущей частоты и увеличение интенсивности жемчужин происходит в момент достижения максимума вариации H -компоненты на станции, расположенной на ночной стороне. Это дает основание предполагать, что источник жемчужин находится в ночной магнитосфере.

3.3. Серия всплесков А с периодом следования ~5 мин

Серия всплесков с периодом следования ~5 мин представлена на верхней панели рис. 5а с большим временным разрешением. На нижней панели представлена вариация B_z -компоненты геомагнитного поля на спутнике THEMIS D, который, судя по величине поля, снова находился внутри магнитосферы после кратковременного попадания в переходную область (рис. 4, нижняя панель). Примерно за 10 мин до начала серии на спутнике регистрируются две кратковременные вариации B_z , во время которых поле значительно уменьшается, из чего можно сделать вывод если

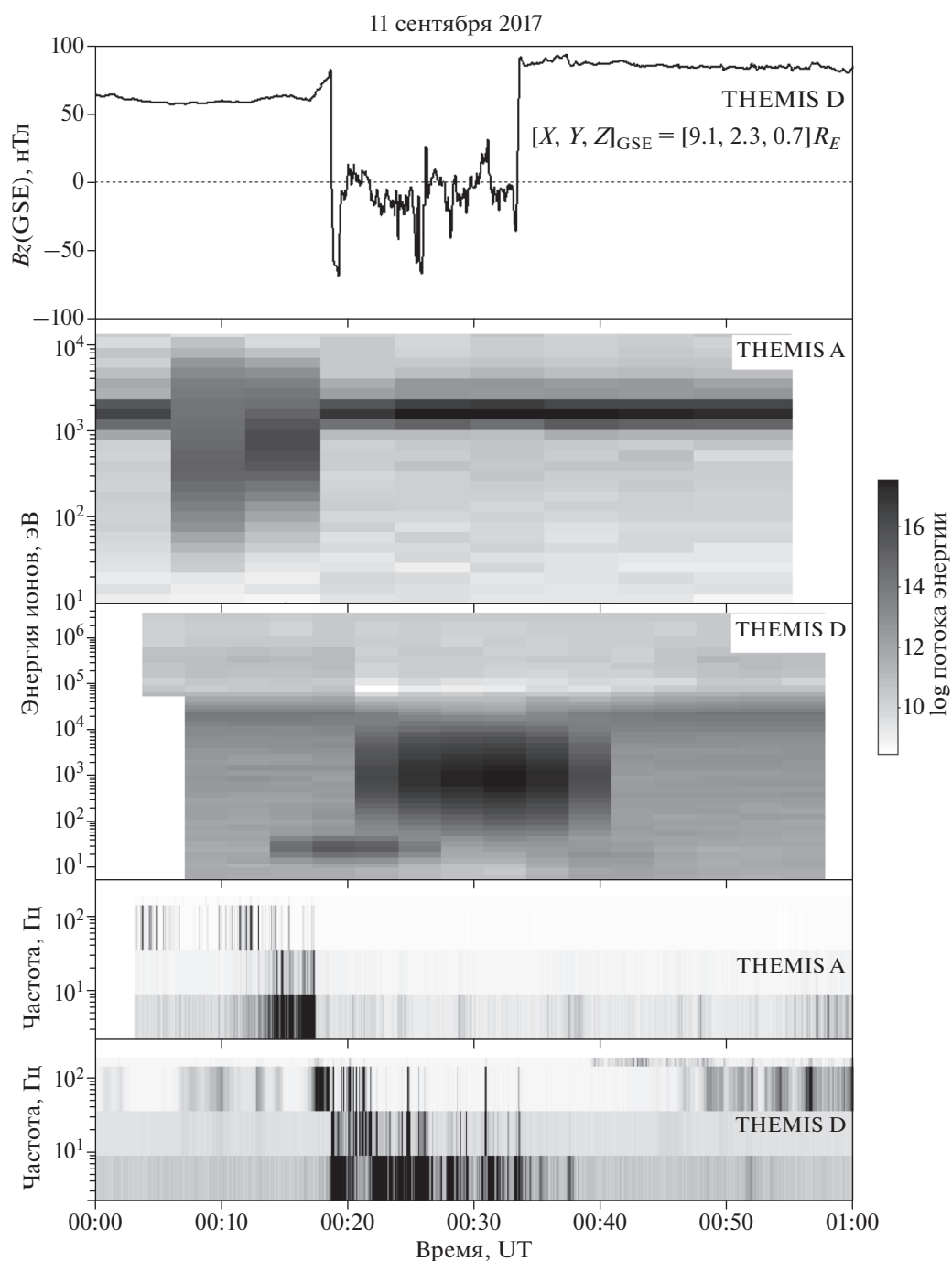


Рис. 3. Признаки смещения магнитопаузы за орбиту спутника THEMIS D. *Верхняя панель:* уменьшение вертикальной компоненты магнитного поля с вариацией в начале и конце интервала, обусловленной прохождением спутника через токовый слой на магнитопаузе; *две средних панели:* спектрограммы, иллюстрирующие особенности потоков протонов в переходной области (THEMIS A) и на спутнике THEMIS D; *две нижние панели:* появление волновой активности в диапазоне ниже 10 Гц, регистрируемой ранее спутником THEMIS A в области, непосредственно прилегающей к магнитопаузе со стороны солнечного ветра.

не об еще одном выходе спутника в переходную область, то, по крайней мере, о приближении магнитопаузы к его орбите. Через 6–7 мин наблюдаются еще три отрицательных вариации B_z , амплитуда которых в разы меньше амплитуды первых

двух, а период следования немногим меньше пяти минут. Обращаем внимание на сходство формы возмущения в B_z -компоненте с формой серии НЧ-возмущения. Для облегчения сравнения мы и те, и другие обозначили одинаковым образом.

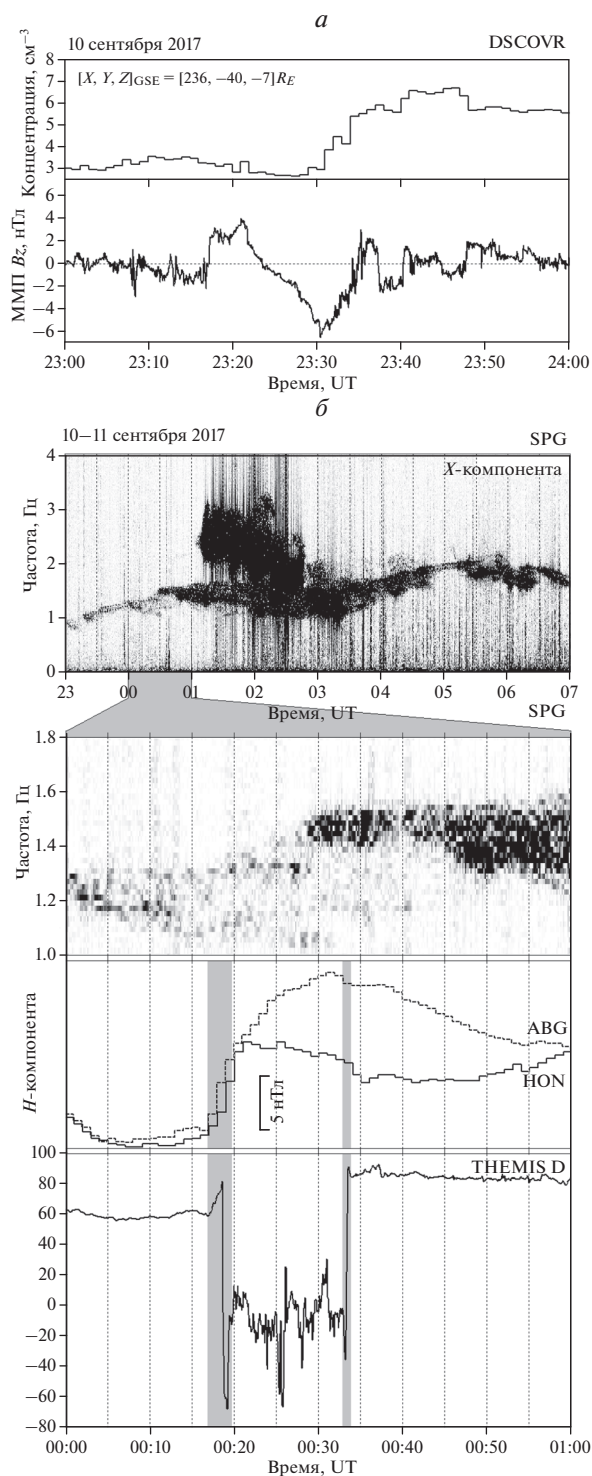


Рис. 4. Отклик пульсаций типа “жемчужины” на увеличение плотности солнечного ветра. (а) — ситуация в солнечном ветре по данным спутника DSCOVR; (б) — сверху вниз: общая форма геомагнитной активности на субравораторных широтах; динамика пульсаций типа “жемчужины” до и после скачка плотности; ступенеобразное усиление H -компоненты в низких широтах в дневном (HON) и ночном (ABG) секторах; вариация B_z -компоненты на спутнике THEMIS-D во время кратковременного экскурса магнитопаузы за орбиту спутника. Вертикальными серыми полосками отмечены моменты прохождения спутника через токовый слой на магнитопаузе.

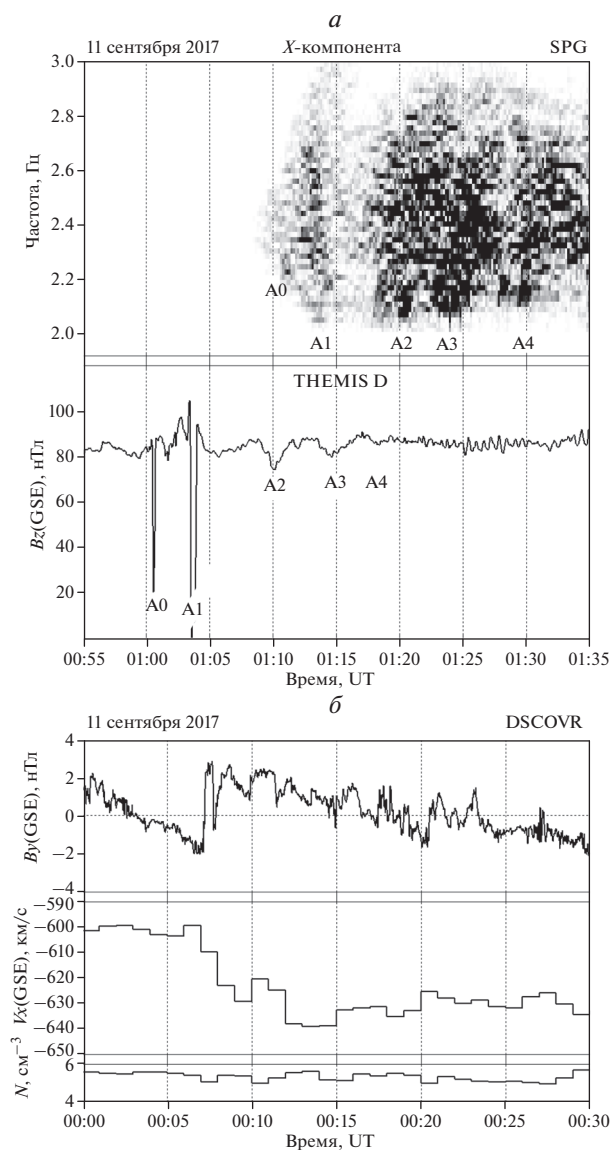


Рис. 5. Серия пятиминутных всплесков (режим А) в данных индукционного магнитометра и признаки волнового возмущения на магнитопаузе, имеющие схожую форму (а); изменения V_x -компоненты скорости солнечного ветра и V_y -компоненты ММП (б).

Первый всплеск А0 на спутнике зарегистрирован около 01 UT (рис. 5а, нижняя панель). Принимая во внимание сделанную выше оценку времени распространения возмущения в солнечном ветре 45–50 мин, можно предположить, что вариации B_z -компоненты на спутнике THEMIS D, были инициированы контактом магнитопаузы с еще одной неоднородностью солнечного ветра. Прохождение фронта этой неоднородности через спутник DSCOVR зарегистрировано в ~00:07 UT и выглядит как ступенеобразное увеличение V_y -компоненты ММП и V_x -компоненты скорости плазмы на фоне практически неменяющейся плотности N (рис. 5б).

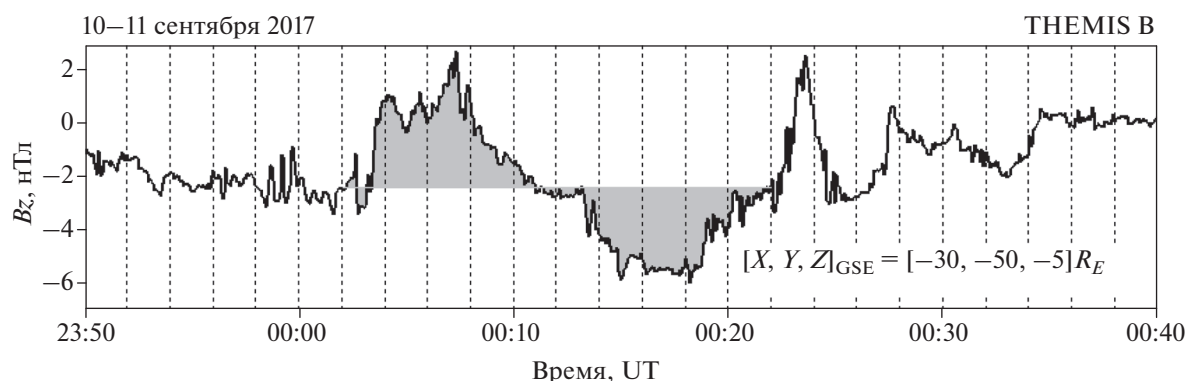


Рис. 6. Квазисинусоидальная вариация B_z -компоненты ММП перед фронтом неоднородности плотности плазмы солнечного ветра (см. рис. 4).

3.4 Серия всплесков B с периодом следования ~ 20 мин

В работе [Safargaleev et al., 2002] серия всплесков герцового диапазона с периодом следования ~ 15 мин объяснялась модуляцией инкремента нарастания ионно-циклотронной неустойчивости волной магнитозвукового типа. В рассматриваемом случае серия всплесков B (рис. 2) характеризуется необычно большим периодом следования ~ 20 мин. Мы не нашли в литературе информации о геомагнитных пульсациях с периодом выше, чем период хорошо изученных пульсаций $Pc5$ ($T \sim 600$ с). Исключение составляют достаточно часто упоминаемые пульсации $Pc6$ (период 5–40 мин), но они представляют собой не волновой процесс, а являются результатом прохождения над наземным регистратором системы ионосферных токов на флангах авроральных структур типа “факел” или омега-сияния, например, [Safargaleev et al., 2005 и ссылки в ней]. Отметим, что в процитированной выше работе [Safargaleev et al., 2002] не удалось обнаружить признаков модулирующей волны в наземных данных. Учитывая все выше изложенное, мы провели поиск запускающего модулирующую волну агента в солнечном ветре, опираясь на численную характеристику 20 мин.

В качестве первого кандидата на запуск модулирующей волны мы рассматриваем сжатие магнитосферы в результате быстрого увеличения концентрации солнечного ветра. Напомним, что в разделе 3.2 с этим возмущением связывалось увеличение несущей частоты и интенсивности пульсаций типа “жемчужин”. Из данных спутника THEMIS D на рис. 3 видно, что сжатие длится около 20 мин (например, изменение энергии и потока ионов, а также изменение характера волновой активности в диапазоне ниже 10 Гц).

Вторым кандидатом может быть квазисинусоидальная вариация B_z -компоненты ММП перед фронтом возмущения плотности на спутнике DISCOVER (рис. 4a). Вариация длится примерно

20 мин. На рисунке 6 вариация представлена с большим временным разрешением. Возмущение зарегистрировано также на спутнике THEMIS B, положение которого показано на рис. 1в. Здесь для наглядности вариация выделена серым цветом. Факт регистрации возмущения B_z сначала на дальнем спутнике DISCOVER, а затем на THEMIS B, расстояние между которыми вдоль оси X составляет $\sim 266 R_E$, указывает на то, что она связана скорее с некоей пространственной структурой в солнечном ветре, чем представляет собой временную вариацию. Действительно, оцененная по времени запаздывания скорость распространения структуры от спутника к спутнику вдоль линии Солнце–Земля составляет ~ 600 км/с, что близко по значению к V_x -компоненте скорости солнечного ветра в данных DISCOVER на рис. 5б.

4. ДИСКУССИЯ

4.1. Численные оценки и пространственное распределение НЧ-возмущения

Представление данных в виде сонограмм позволило нам сделать качественные выводы о форме и динамике исследуемого НЧ-возмущения. В частности, мы выделили три разных режима пульсаций — колебания типа “жемчужин” и две серии всплесков, различающиеся периодом следования и поведением несущей частоты, что позволило нам связать эти режимы с изменением параметров солнечного ветра. Для получения количественных оценок, на основе которых далее будет сделано предположение относительно положения источника пульсаций в магнитосфере, мы использовали представление данных в виде спектров и временных рядов.

На рисунке 7 сравнивается интенсивность пульсаций типа жемчужин на двух станциях до и после скачка плотности солнечного ветра. Спектральные кривые (рис. 7a) показывают, что на обеих станциях увеличилась несущая частота жемчу-

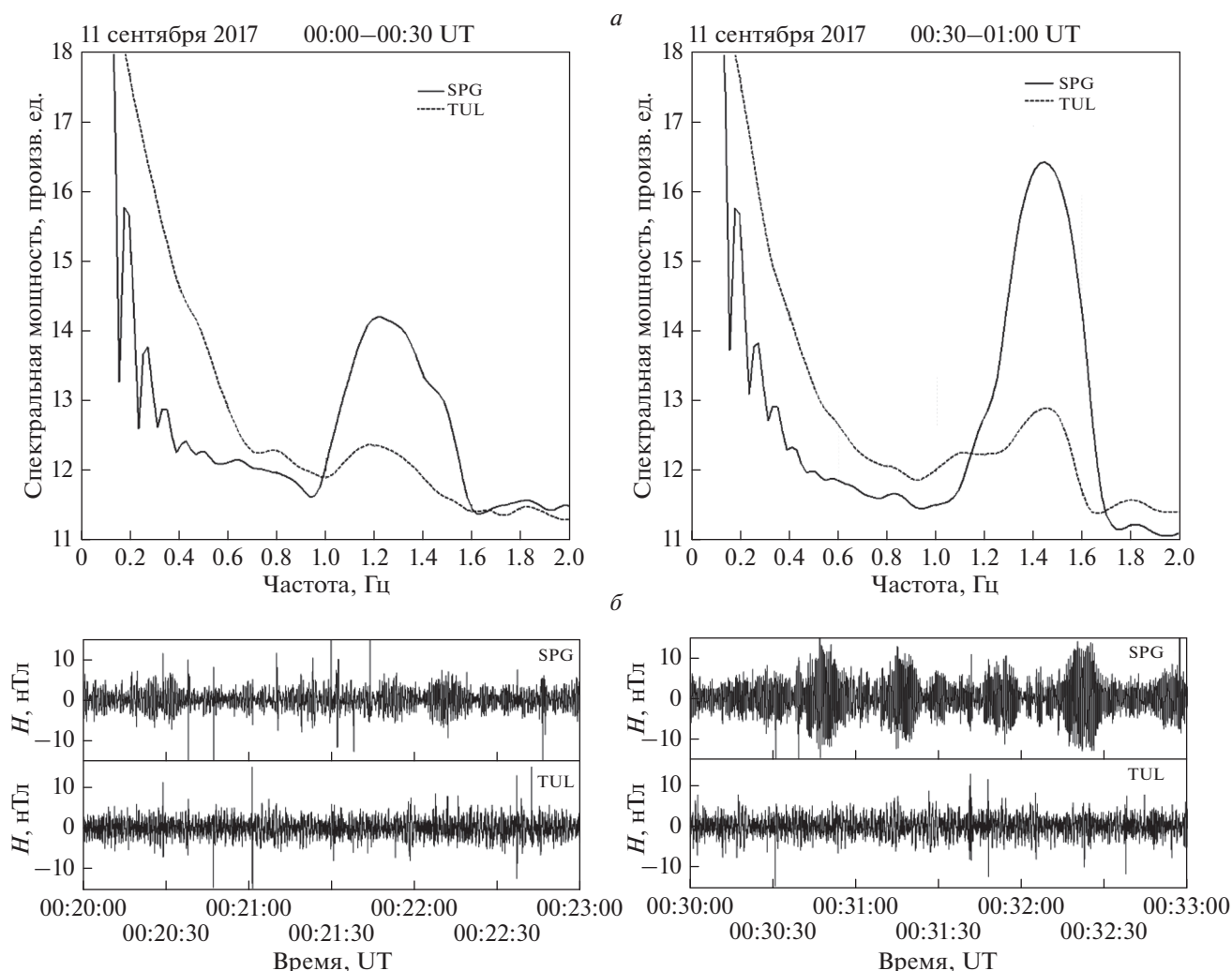


Рис. 7. Спектр (а) и волновая форма (б) пульсаций типа “жемчужины” в авроральной (TUL) и субаврорально (SPG) зонах до (слева) и после (справа) скачка плотности солнечного ветра.

жин (с ~ 1.2 Гц перед скачком до ~ 1.45 Гц после скачка). Рост интенсивности сигнала после скачка более выражен в субавроральных широтах, что подтверждается волновой формой сигнала на рис. 7б. В авроральной зоне форма сигнала напоминает “жемчужины” в меньшей степени. Дело в том, что на частотах меньше 1 Гц велики внутренние шумы магнитометра в Верхнетуломске (TUL) из-за конструкции используемых там индукционных датчиков. Этот низкочастотный шум препятствует идентификации “жемчужин”, хотя спектральное представление демонстрирует их наличие достаточно убедительно. В целом, интенсивность жемчужин в авроральной зоне слабее, чем на субавроральной станции. В приведенных на рис. 7 примерах амплитуда $Pc1$ в SPG достигает 15 мкА/м, в то время как в TUL не превышает уровня шума (10 мкА/м). Спектраль-

ная интенсивность сигнала в TUL также заметно ниже, чем в SPG.

На рисунке 8 приведены спектры пульсаций в виде серии всплесков А и В (также рис. 2). Пульсации типа А, характеризующиеся нами ранее по сонограммам как всплески с постоянной несущей частотой, имеют максимум на частоте ~ 2.5 Гц, которая действительно практически не меняется во времени (рис. 8а). Пульсации типа В (рис. 8б) в начале интервала имеют максимум на частоте ~ 2.2 Гц, которая к концу интервала уменьшается на ~ 0.5 Гц. Такое поведение несущей частоты наблюдается как в авроральной зоне, так и в субавроральной обсерватории.

Для оценки интенсивности пульсаций обоих типов мы вычислили средние значения модуля амплитуды колебаний за промежуток времени, во время которого наблюдался каждый всплеск. Результаты расчета для SPG представлены на ниж-

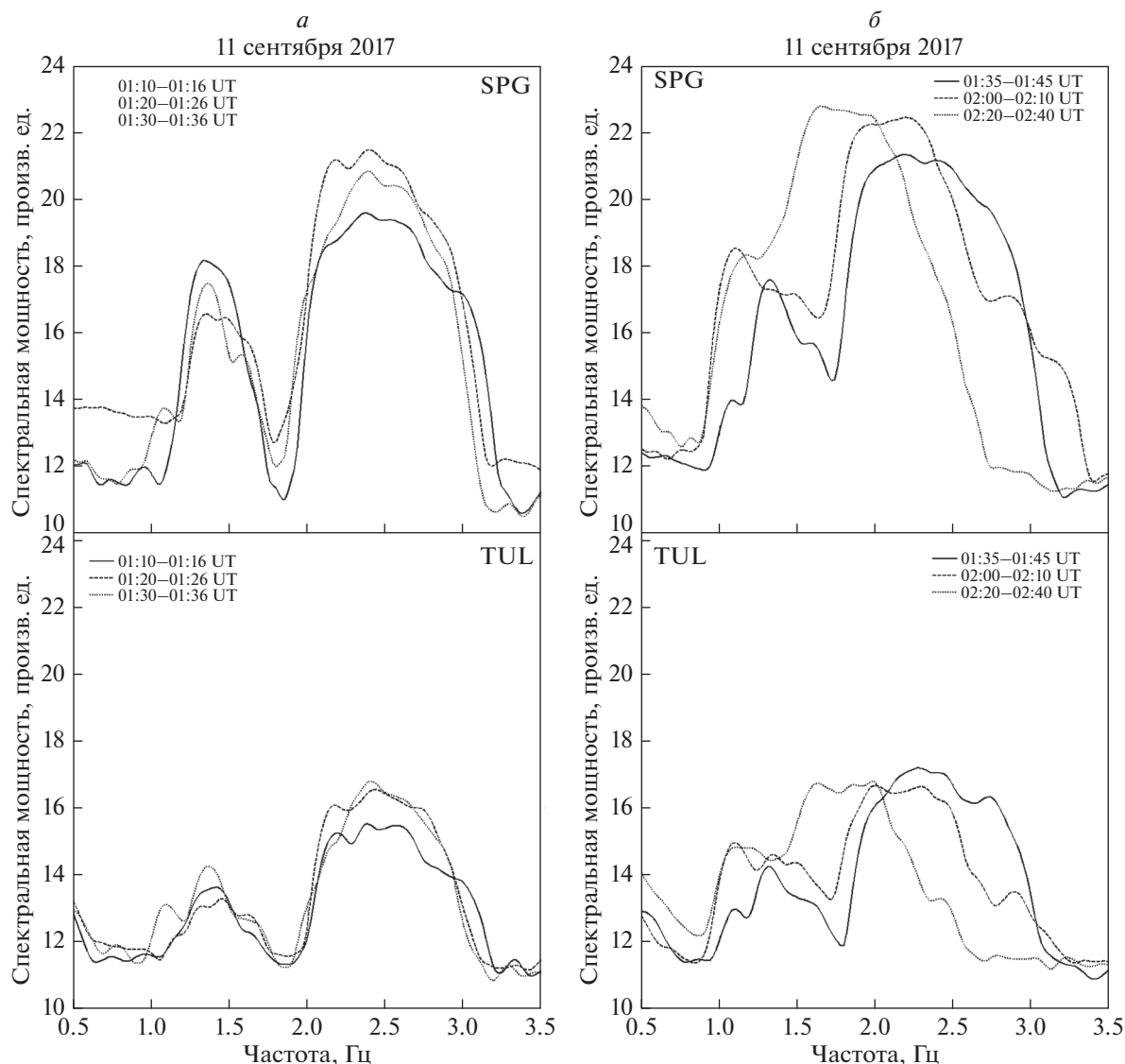


Рис. 8. Спектральная интенсивность пульсаций в виде серии всплесков с несущей частотой ~ 2.5 Гц, постоянной (а) и убывающей (б) во времени.

ней панели рис. 2 в виде диаграммы. Видно, что наибольшую интенсивность имеет всплеск В2 (~ 92 мкА/м), и в целом всплески серии В более интенсивны, чем всплески серии А и “жемчужины”. Интенсивность всплесков в серии А постепенно нарастает, достигает максимума ~ 56 мкА/м во время всплеска А3, после чего снижается. Такую же тенденцию, но с менее заметным снижением после достижения максимума, демонстрирует серия всплесков В. Интенсивность серий А и В в авральной зоне (на рисунке не представлена) в разы слабее и имеет тот же порядок величины, что и интенсивность жемчужин (то есть не превосходит 10 мкА/м). О какой-либо закономерности изменения амплитуды от всплеска к всплеску

говорить не приходится, поскольку изменения лежат в пределах погрешности усреднения.

Согласно теоретическим представлениям, пульсации $Pc1$ являются волнами альвеновского типа, генерируемым неоднородной магнитосферной плазмой в результате развития ионно-циклотронной неустойчивости. Распространяясь вдоль силовых линий от области генерации, волны попадают в ионосферу, после чего имеют возможность распространяться в горизонтальном направлении в ионосферном волноводе. Таким образом, факт регистрации $Pc1$ на конкретной обсерватории не означает, что область их генерации находится на силовой линии, у подножия которой обсерватория расположена. В пионерских работах по изучению пульсаций $Pc1$ отмечалось,

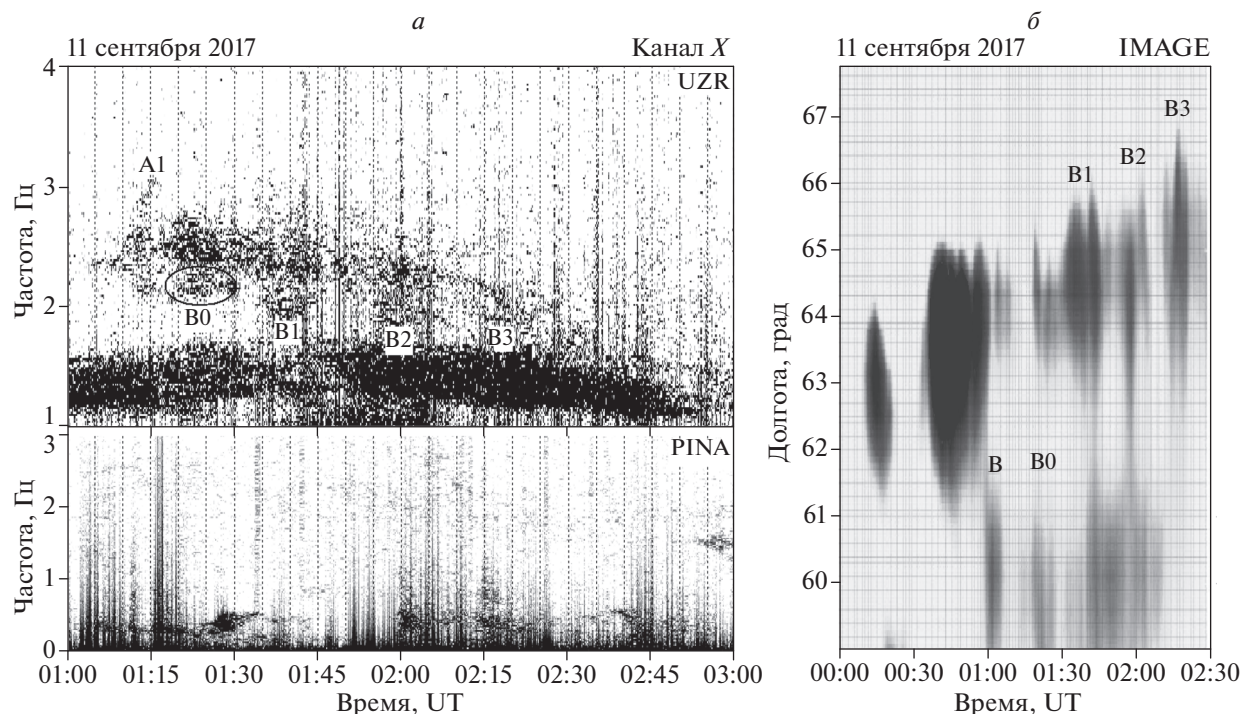


Рис. 9. Сонограммы, показывающие форму геомагнитной активности в утреннем (UZR) и послеполуденном (PINA) секторах (а); признаки 20-ти минутной модулирующей волны в эквивалентном ионосферном токе (западный электроджет) по данным сети магнитометров IMAGE (б).

что одним из источников информации о положении области генерации $Pc1$ может служить распределение амплитуды пульсаций на поверхности Земли при одновременных наблюдениях на меридиональной сети станций [Троицкая и др., 1975; Baransky et al., 1981]. В данном случае мы располагали результатами наблюдений только двух обсерваторий, которые были откалиброваны идентичным образом. Это позволило провести количественное сравнение интенсивности пульсаций в авроральной (TUL, $L \sim 5.5$) и субавроральной (SPG, $L \sim 3.5$) зонах. Сравнение показало, что место выхода ионно-циклотронных волн из ионосферы находилось ближе к широте станции SPG, а положение источника в магнитосфере — на удалении $\sim 3.5 R_E$ от поверхности Земли (но не дальше, чем $5.5 R_E$).

Кроме данных идентичным образом калиброванных индукционных магнитометров в SPG и TUL, в нашем распоряжении были данные индукционного магнитометра ИСЗФ СО РАН в поселке Узур, UZR ($52.2^\circ N$, $104.4^\circ E$, $L \sim 2.3$), а также данные магнитометров сети CARISMA на американском континенте [Mann et al., 2008]. Слабые признаки серий всплесков А и В обнаруживаются на сонограмме станции UZR, которая в это время находится в утреннем секторе (рис. 9а, верхняя панель). В отличие от станций в послеполуденном секторе, в данных UZR серия всплес-

ков В начинается раньше. На сонограмме дополнительный всплеск обозначен В0 и акцентирован эллипсом. В связи с этим напомним, что разница между станциями заключается не только в MLT. Параметр L станции UZR на единицу меньше, чем таковой для SPG, т.е. в экваториальную плоскость магнитосферы эта станция проектируется ближе к Земле, чем SPG.

Просмотр данных сети магнитометров CARISMA, находящихся в дневном секторе, не выявил усиления волновой активности в диапазоне выше 1 Гц. Сонограммы некоторых станций находятся на сайте <http://www.carisma.ca/carisma-data/fgm-quick-plot>, а в качестве примера, подтверждающего сказанное, на нижней панели рис. 9а мы приводим сонограмму станции Pinava, PINA ($50.2^\circ N$, $163.0^\circ E$, $L \sim 4.1$), находящуюся в это время в послеполуденном секторе.

Обобщим вышесказанное. Источник пульсаций $Pc1$, наблюдаемых в интервале 00–03 UT (“жемчужины” с несущей частотой 1.2–1.4 Гц и серии всплесков А и В в частотном диапазоне 2–3 Гц), находился вероятнее всего в ночной магнитосфере на расстоянии $\sim 3.5 R_E$ от поверхности Земли (но не дальше, чем $5.5 R_E$). Источником пульсаций $Pc1$ внутри магнитосферы традиционно считают горячие анизотропные ионы. С развитием спутниковых наблюдений эта теоретическая гипотеза получила экспериментальное подтвер-

ждение (например, [Yahnina et al., 2003] и ссылки в ней). Полагается, что для генерации $Pc1$ магнитосфера должна находиться в подготовленном состоянии (например, [Erlandson et al., 1994]). Отсутствие пульсаций на станциях в дневном секторе означает, что в данном интервале УТ подготовленной была (или оставалась) только ночная магнитосфера.

4.2. Теоретическая интерпретация наблюдений

4.2.1. Изменение режима пульсаций типа “жемчужины”

Структурированные пульсации типа “жемчужин” являются наиболее изученной разновидностью пульсаций $Pc1$. В частности, их реакция на внезапное сжатие магнитосферы описывалась в литературе и ранее, например, обзор [Kangas et al., 1998]. Увеличение несущей частоты $Pc1$ типа КУП (колебания убывающего периода) традиционно связывают с изменением магнитного поля в месте их генерации, приводящим к локальному увеличению ионной гирочастоты. Увеличение поля может произойти как при сжатии магнитосферы солнечным ветром, так и в результате смещения анизотропной плазмы, являющейся источником $Pc1$, ближе к Земле. В рассмотренном в работе случае причиной роста несущей частоты “жемчужин” может быть сжатие магнитосферы в результате увеличения концентрации плазмы солнечного ветра. Оставляя за рамками исследования теоретическую конкретизацию, мы, для расширения существующей статистики, ограничились выявлением количественных характеристик пульсаций, а также приводим качественные соображения относительно положения их источника в магнитосфере. Напомним, что на ночное положение источника “жемчужин” указывает не только отсутствие пульсаций на частоте выше 1 Гц в дневном секторе, как было показано в предыдущем разделе, но и схожесть временной вариации несущей частоты с вариацией H -компоненты магнитного поля на ночной низкоширотной станции ABG (рис. 4б).

4.2.2. Серия всплесков А

Неструктурированные пульсации $Pc1$, имеющие на сонограммах форму серии всплесков с постоянной несущей частотой, достаточно подробно рассматривались в контексте отклика магнитосферы на скачек давления солнечного ветра, SI [Kangas et al., 1986; Safargaleev et al., 2002]. В рассматриваемом случае серия всплесков А обнаруживается a — на ночной стороне, b — спустя почти час после SI и c — имеет период следования ~ 5 мин. По этим трем характеристикам серия А отличается от пульсаций, инициированных SI напрямую ([Safargaleev et al., 2002]).

В процитированной выше работе предполагалось, что “серийность” НЧ-отклика на SI обусловлена модуляцией инкремента нарастания ионно-циклотронной неустойчивости длиннопериодной волной, признаки которой не удалось обнаружить ни в солнечном ветре, ни в наземных данных. В нашем случае признаком такой волны мы считаем вариацию Bz -компоненты геомагнитного поля на спутнике THEMIS D (рис. 5а), который по удачному стечению обстоятельств находился в это время вблизи подсолнечной точки на магнитопаузе. Предположение основано на схожести вариации Bz -компоненты с формой серии всплесков А. Возможно, спутник зарегистрировал прохождение по магнитопаузе поверхностной волны, инициированной быстрой вариацией Vu -компоненты ММП с одновременным ступенчатным усилением Vx -компоненты скорости солнечного ветра. Конкретизация механизма запуска, структуры поверхностной волны и волны, распространяющейся при этом внутри магнитосферы, выходит за рамки данного исследования. Обратим внимание только на следующую важную деталь. Запаздывание первого всплеска пульсаций А0 (рис. 5, верхняя панель) в данных индукционных магнитометров относительно всплеска А0 в Bz -компоненте на спутнике составляет ~ 10 мин. Согласно [Tenfjord et al., 2017], такую же величину имеет статистическое время отклика магнитосферы на быстрое изменение Vu -компоненты ММП. Опираясь на результаты оценок в разделе 4.1, предположим, что источник $Pc1$ находится в ночной магнитосфере на расстоянии $\sim 4 R_E$, и получим оценку групповой скорости “модулирующей” волны ~ 140 км/с. Столь небольшой скоростью распространения характеризуются медленные магнитозвуковые волны [Гульельми и Троицкая, 1973], в частности, так называемые внутренние “гравитационные” волны, рассмотренные в работе [Сафаргалеев и Мальцев, 1986]. Из-за кривизны магнитного поля и наличия градиента плазменного давления магнитное поле волны имеет сильную продольную компоненту, что и может привести к модуляции инкремента ионно-циклотронной неустойчивости через периодические изменения, например, коэффициента анизотропии.

4.2.3. Серия всплесков В

Просмотр литературы показал, что данный вид пульсаций является еще менее изученным, чем серия всплесков с периодом повторения 5 мин и постоянной несущей частотой. Если эти пульсации также связывать с модулирующей волной, то теория в первую очередь должна объяснить необычной большой период волны (20 мин) и причину уменьшения несущей частоты.

В спутниковых данных мы нашли два вида возмущений с характерным временем 20 мин. Это экскурс дневной магнитопаузы за орбиту спутника THEMIS D (рис. 3) и квазисинусоидальная вариация B_z -компоненты ММП перед фронтом возмущения концентрации (рис. 4а и 6). На земной поверхности двадцатиминутные вариации обнаруживаются в данных субавроральных магнитометров сети IMAGE и на магнитной обс. SPG. Амплитуда вариаций всего ~ 10 нТл, и более наглядно наземный признак 20-мин модулирующей волны выглядит в пересчете магнитных вариаций в вариации эквивалентного ионосферного тока, интенсивность и положение которого можно проследить в динамике с помощью *on-line* процедуры на сайте проекта MIRACLE (http://space.fmi.fi/image/www/?page=equiv_currents_1D). Результаты расчета представлены на рис. 9б в виде диаграмм широта/время, где интенсивность тока (в произвольных единицах) передается в градиациях серого: наиболее интенсивному току соответствуют более темные участки диаграмм. В качестве базовой линии взяты вариации магнитного поля за промежуток 00:00–02:30 UT в спокойный день 31.08.2017 г. Индексам B0–B3 обозначены интенсификации тока, соответствующие всплескам B0–B3 на сонограммах UZR и SPG. Видно, что этим четырем интенсификациям предшествует еще одна, которую мы обозначили как В. Координаты точки, где ток максимален, по нашей оценке составляют $<60^\circ$ N, 24° E.

Если у серии всплесков А можно было вполне определенно идентифицировать момент ее начала, что дало дополнительную информацию о возможной природе модулирующей волны, то при определении такового для серии всплесков В возникли сложности. Действительно, на станции SPG серия начинается всплеском B1 (рис. 2), на станции UZR серия начинается на ~ 20 мин раньше (всплеск B0 на рис. 9а), а в динамике эквивалентного ионосферного тока первым всплеском можно считать всплеск В, начавшийся около 01 UT. Примечательно, что временной промежуток после начала поджатия магнитопаузы (рис. 3) можно разбить на несколько именно 20-ти минутных интервалов. Сначала мы видим 20-ти минутное присутствие ионов с энергиями 100 эВ–10 кэВ и волновую активность в диапазоне 0–10 Гц на спутнике THEMIS D. Затем следует двадцатиминутная пауза с $\sim 00:40$ до 01:00 UT, после чего возникает первая интенсификация эквивалентного тока (всплеск В на рис. 9б). Еще через ~ 20 мин первый признак пульсаций серии В обнаруживаются на станции UZR (всплеск B0 на рис. 9). Далее более четкие серии всплесков B1, B2 и B3 видны в данных магнитометров в SPG и TUL.

Можно предположить, что модулирующая волна по своей природе представляет крупномасштабный МГД-резонанс магнитосферы, в кото-

ром максимум амплитуды резонансных колебаний постепенно смещается от Земли. В пользу предположения свидетельствует смещение областей интенсификации эквивалентного ионосферного тока в область высоких широт (рис. 9б), появление всплесков $Pc1$ сначала на средних широтах (всплеск B0 на сонограмме станции UZR, $L \sim 2.3$), а потом в субавроральной зоне (всплеск B1 на сонограмме станции SPG, $L \sim 3.5$). Уменьшение несущей частоты серии всплесков В также может означать удаление их источника от Земли, в область более слабого поля. Если амплитуда резонансных колебаний увеличивалась со временем, что подтверждается ростом амплитуды пульсаций серии В на рис. 2 (нижняя панель), можно предположить что в начале резонанса интенсивность модулирующей волны была недостаточной, чтобы инициировать ионно-циклотронную неустойчивость. Поэтому в пульсациях серии В мы просто не видим нескольких первых всплесков.

Как альтернативу резонансу, вызванному ударом по магнитопаузе фронта неоднородности концентрации, мы рассматриваем проникновение в магнитосферу квазисинусоидального возмущения B_z -компоненты, зарегистрированного спутником DSCOVR перед фронтом неоднородности плотности солнечного ветра (рис. 4а). Вариация начинается с экскурса B_z в область положительных значений и по своей форме напоминает вариацию перед началом суббури, полученную в работе [Wild et al., 2009] методом наложения эпох. В этой работе вариация началась за три часа до начала суббури, но в более ранних исследованиях конкретных суббурь это время могло быть и меньше (например, порядка десяти минут в работе [Can et al., 1978]). В работе [Бархатова и др., 2017] показано, что возмущениями B_z -компоненты ММП могут быть также обусловлены синхронные ионосферные и геомагнитные возмущения с периодами от 15 до 30 мин, регистрируемые в ночном секторе среднеширотной ионосферы. При этом высокую эффективность в плане воздействия на магнитосферу имеют вариации ММП в турбулентной области между ударной волной, оторвавшейся от магнитного облака в процессе его распространения, и ведущим краем магнитного облака [Бархатов и др., 2018].

Исходя из имеющихся данных, мы не можем отдать предпочтение какому либо из предложенных выше причин и, как следствие, возможных механизмов генерации серии всплесков В, поскольку не можем надежно идентифицировать начало серии в наземных данных. Этот момент определяет время распространения вариации параметров межпланетной среды от спутников THEMIS В (рис. 6) или THEMIS D (рис. 3) до области внутри магнитосферы, где эта вариация тем или иным образом промодулировала инкремент нарастания ионно-циклотронной неустойчиво-

сти. Например, исходя из положения спутника THEMIS B относительно подсолнечной точки на магнитопаузе (оцененной по данным спутника THEMIS D), время задержки всплесков B, B0 и B1 относительно момента подхода неоднородности к магнитопаузе составляет приблизительно 60, 80 и 100 мин, соответственно.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Форма и динамика необычного возмущения в диапазоне геомагнитных пульсаций $Pc1$, зарегистрированного в ранние утренние часы MLT на поздней фазе восстановления сильной магнитной бури, проанализированы в контексте изменений параметров межпланетной среды. Пульсации наблюдались в авроральной и субавроральной зонах, а также в средних широтах, и имели сложную структуру в виде мультиплетных “жемчужин” (диапазон частот 1–1.5 Гц) и двух серий узкополосных всплесков (диапазон частот 2–3 Гц) с периодом следования ~5 и ~20 мин. Пульсации в виде серии всплесков являются редким событием и регистрируются преимущественно в дневные часы.

Сопоставление динамики пульсаций $Pc1$ с изменением параметров межпланетной среды происходило с использованием данных спутника DSCOVR, проводившим измерения далеко в солнечном ветре, а также спутников THEMIS. Спутники THEMIS D и A находились вблизи подсолнечной точки по разные стороны от магнитопаузы, а THEMIS B — в солнечном ветре у утреннего фланга магнитопаузы. При этом, при поисках возможного агента, запускающего $Pc1$ в виде серий всплесков, мы опирались на период следования всплесков в серии. Результаты сравнения следующие.

Изменение несущей частоты и интенсивности мультиплетных жемчужин явилось откликом на скачок концентрации плазмы солнечного ветра.

Серия всплесков с периодом следования ~5 мин могла быть инициирована одновременным усилением B_u -компоненты межпланетного магнитного поля и скорости солнечного ветра, имевшим место спустя ~40 мин после скачка концентрации.

Возможными причинами появления серии всплесков с периодом следования ~20 мин мы считаем либо отклик магнитосферы на кратковременный экскурс дневной магнитопаузы к Земле, либо колебания близкого периода в переходной турбулентной области перед фронтом возмущения концентрации и следующим перед ним фронтом ударной волны. Недостаток данных не позволяет отдать предпочтение какой-либо из этих двух причин.

Количественные оценки наблюдаемых пульсаций, дополненные результатами качественного

анализа данных индукционных магнитометров в утреннем и дневном секторах, показали, что источник $Pc1$ находится в ночной части магнитосферы на удалении $3.5 R_E$ от поверхности Земли (но не дальше, чем $5.5 R_E$). Вероятно, в этот временной интервал поздней стадии восстановления магнитной бури “подготовленной” для генерации пульсаций была (или оставалась) только ночная часть магнитосферы.

В качестве основного механизма появления серии всплесков рассматривается инициация внутри магнитосферы волнового процесса, приводящего к модуляции инкремента нарастания ионно-циклотронной неустойчивости магнитосферной плазмы. Признаки модулирующей волны для серии пятиминутных всплесков обнаружены в данных спутника THEMIS D, проводящего измерения внутри магнитосферы вблизи подсолнечной точки на магнитопаузе. Признаки модулирующей волны для серии двадцатиминутных всплесков обнаружены в динамике эквивалентного ионосферного тока в субавроральной части сети магнитометров IMAGE. Наблюдаемое смещение всплесков ионосферного тока в область высоких широт, убывание несущей частоты и возрастание амплитуды серии всплесков B объясняется динамикой волнового процесса, вызывающего модуляцию ионно-циклотронной неустойчивости.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Данные спутников THEMIS и DSCOVR взяты из базы данных CDAWeb, провайдеры V. Angelopoulos и A. Szabo, соответственно (оба из NASA). Магнитограммы низкоширотных обсерваторий ABG и HON получены с сайта INTERMAGNET. Параметр L для обсерваторий TUL, SPG и UZR определялся он-лайн на сайте виртуальной обсерватории VITMO (https://cohoweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm_vitmo.html). Он-лайн процедура расчета эквивалентных ионосферных токов доступна на сайте проекта MIRACLE. Авторы благодарят И.Р. Манна, Д.К. Миллинга и сотрудников проекта CARISMA за магнитные данные. Сеть CARISMA находится под управлением Университета Альберты и финансируется Канадским Космическим Агентством. Данные индукционного магнитометра ИСЗФ СОРАН в obs. Узур предоставлены Р.А. Рахматулиным. Авторы благодарят Е.Д. Терещенко, В.Ф. Григорьеву, Р.Ю. Юрика (все ПГИ) и А.Л. Котикова (СПбФ ИЗМИРАН) за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Арыков А., Белова Е., Гвоздевский Б., Мальцев Ю., Сафаргалеев В. Геомагнитная буря как результат усиления

- ния высокоширотного геомагнитного потока // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 3. С. 39–49. 1996.
- Бархатова О.М., Косолапова М.В., Бархатов М.А., Ревунов С.Е. Событие синхронных возмущений в ионосфере и геомагнитном поле над станцией Казань // Солнечно-земная физика. Т. 3. № 4. С. 63–73. 2017.
- Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Главацкий Ю.А. Суббуревая активность и ориентация фронта ударной волны межпланетного магнитного облака // Abs. 41 Annual Seminar. Physics of Auroral Phenomena. Апатиты, 12–16 марта 2018. Р. 20–20. 2018. http://pgia.ru:81/seminar/abstracts_book2018.pdf
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 208 с. 1973.
- Лебедь О.М., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. Программно-аппаратный комплекс для фазовых измерений в крайне низких-сверхнизких диапазонах частот // Приборы и техника эксперимента. № 3. С. 56–62. 2012.
- Сафаргалеев В.В., Васильев А.Н., Пчелкина Е.В., Серебрянская А.В. Геомагнитные пульсации диапазона 0.1–5 Гц, индуцируемые импульсом динамического давления солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 4. С. 482–492. 2003.
- Сафаргалеев В.В., Мальцев Ю.П. Внутренние “гравитационные” волны в плазменном слое // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 26. № 2. С. 270–274. 1986.
- Троицкая В.А., Баранский Л.Н., Матвеева Э.Т., Фейгин Ф.З., Гланжо Ф., Виноградов П.А., Кошелевский В.К. О положении источников пульсаций Pc1 в магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 15. № 3. С. 525–531. 1975.
- Anderson B.J., Fuselier S.A. Magnetic pulsations from 0.1 to 4.0 Hz and associated plasma properties in the Earth’s subsolar magnetosheath and plasma depletion layer // J. Geophys. Res. V. 98. № 2. P. 1461–1479. 1993.
- Anderson B.J., Hamilton D.J. Electromagnetic ion cyclotron waves stimulated by modest magnetospheric compressions // J. Geophys. Res. V. 98. № 7. P. 11369–11382. 1993.
- Baransky L.N., Golikov Yu. V., Feygin F.Z., Harchenko I.A., Kangas J., Pikkarainen T. Role of the plasmopause and ionosphere in the generation of pearl pulsations // J. Atmos. Terr. Phys. V. 43. № 9. P. 875–881. 1981. doi 10.1016/0021-9169(81)90079-9
- Caan M.N., McPherron R.L., Russell Ch.T. The statistical magnetic signature of magnetospheric substorms // Planet. Space Sci. V. 26. №3. P. 269–279. 1978.
- Dungey J.V. The structure of the exosphere or adventures in velocity space / in: Geophysics, The Earth’s environment, ed. by C. Deuitt, Gordon and Breach, N.Y., 550 p. 1963.
- Erlandson R.E., Zanetti L.J., Engebretson M.J., Arnoldy R.L., Bösinger T., Mursula K. Pc1 waves generated by a magnetospheric compression during recovery phase of geomagnetic storm // Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves, (Eds) Engebretson M.J., Takahashi K., and Scholer M., AGU, Washington D.C. 1994. doi 10.1029/GM081p0399
- 10.1029/GM081p0399
- Kangas J., Aikio A., Olson J.V. Multistation correlation of ULF pulsation spectra associated with sudden impulses // Planet. Space Sci. V. 34. № 6. P. 543–553. 1986.
- Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations // Space Sci. Rev. V. 83. P. 435–512. 1998.
- Mann, I. R., Milling D.K., Rae I.J. et al. The upgraded CARISMA magnetometer array in the THEMIS era // Space Sci. Rev. № 141. P. 413–451. 2008. doi 10.1007/s11214-008-9457-6
- Olson J., Lee L. Pc1 wave generation by sudden impulses // Plan. Space Sci. V. 31. № 3. P. 295–302. 1983.
- Park J., Lühr H., Rauberg J. Global characteristics of Pc1 magnetic pulsations during solar cycle 23 deduced from CHAMP data // Ann. Geophys. V. 31. № 9. P. 1507–1520. 2013.
- Safargaleev V., Kangas J., Kozlovsky A., Vasilyev A. Burst of ULF noise excited by sudden changes of solar wind dynamic pressure // Ann. Geophys. V. 20. № 11. P. 1751–1761. 2002.
- Safargaleev V., Sergienko T., Nilsson H., Kozlovsky A., Massetti S., Osipenko S. Combined optical, EISCAT and magnetic observations of omega bands/Ps6 pulsations and an auroral torch in the late morning hours: a case study // Ann. Geophys. V. 23. № 5. P. 1821–1838. 2005.
- Tepley L.R., Wentworth R.C. Hydromagnetic emission, X-rays, and electron bunches, 1. Experimental results // J. Geophys. Res. V. 67. № 9. P. 3317–3333. 1962.
- Tenfjord P., Østgaard N., Strangeway R., Haaland S., Snekvik K., Laundal K.M., Reistad J.P., Milan S.E. Magnetospheric response and reconfiguration times following IMF By reversals // Geophys. Res. V. 122. № 1. P. 417–431. 2017. doi 10.1002/2016JA023018
- Troitskaya V.A. Pulsations of the Earth’s electromagnetic field with periods of 1 to 15 s and their connection with phenomena in the high atmosphere // J. Geophys. Res. V. 66. № 1. P. 5–18. 1961.
- Usanova M.E., Mann I.R., Kale Z.C. et al. Conjugate ground and multisatellite observations of compression-related EMIC Pc1 waves and associated proton precipitation // J. Geophys. Res. V. 115. № 7. A07208. 2010. doi 10.1029/2009JA014935
- Wentworth R.C. Enhancement of hydromagnetic emissions after geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 69. № 11. P. 2291–2298. 1964.
- Wild J.A., Woodfield E.E., Morley S.K. On the triggering of auroral substorms by northward turnings of the interplanetary magnetic field // Ann. Geophys. V. 27. № 9. P. 3559–3570. 2009.
- Wright D.M., Yeoman T.K. CUTLASS observations of a high-m ULF wave and its consequences for the DOPE HF Doppler sounder // Ann. Geophys. V. 17. № 11. P. 1493–1497. 1999.
- Yahnina T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J., Evans D.S. et al. Energetic particle counterparts for geomagnetic pulsations of Pc1 and IPDP types // Ann. Geophys. V. 21. № 12. P. 2281–2292. 2003.