

ОДНОВРЕМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЭМИЦ- И КНЧ/ОНЧ-ВОЛН И ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ ВО ВРЕМЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ СЖАТИЙ МАГНИТОСФЕРЫ

© 2019 г. А. Г. Яхнин^{1,*}, Е. Е. Титова¹, А. Г. Демехов^{1,2}, Т. А. Яхнина¹, Т. А. Попова¹, А. А. Любчич¹, Ю. Маннинен³, Т. Райта³

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

²Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород, Россия

³Геофизическая обсерватория Соданкюля, г. Соданкюля, Финляндия

*e-mail: ayahnin@gmail.com

Поступила в редакцию 29.03.2019 г.

После доработки 22.04.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

Рассмотрены одновременные наблюдения КНЧ/ОНЧ- и ЭМИЦ-волн на спутниках Van Allen Probes в дневной магнитосфере и на земной поверхности во время множественных сжатий магнитосферы, обусловленных флуктуациями динамического давления солнечного ветра. Каждое сжатие магнитосферы приводит к генерации всплеска волн в этих диапазонах частот. На основе данных о спектральных и амплитудных характеристиках волн, измерений магнитного поля и концентрации холодной плазмы рассчитаны коэффициенты питч-угловой диффузии протонов и электронов вблизи конуса потерь. Показано, что КНЧ-волны с частотами < 1 кГц могут быть ответственны за высыпания энергичных (> 30 кэВ) электронов, а ОНЧ-волны на частотах $2\text{--}5$ кГц — за высыпания электронов с энергией ~ 1 кэВ. Наблюдавшиеся на спутниках и на Земле ЭМИЦ-волны связаны с высыпанием протонов с энергиями $10\text{--}100$ кэВ. Энергии частиц, соответствующие максимумам коэффициента диффузии, сопоставлены с энергиями высыпающихся в ионосферу заряженных частиц, определенными по данным низкоорбитальных спутников серии POES, и показано их хорошее соответствие.

DOI: 10.1134/S0016794019060142

1. ВВЕДЕНИЕ

Резонансное взаимодействие энергичных заряженных частиц с электромагнитными ионноциклотронными (ЭМИЦ) и свистовыми волнами [Андронов и Трахтенгерц, 1964; Cornwall, 1965; Kennel and Petcheck, 1966] играет важную роль в динамике радиационных поясов, кольцевого тока и околоземного плазменного слоя. ЭМИЦ-волны генерируются на частотах ниже протонной гирочастоты f_{H^+} . Свистовые волны генерируются на частотах $f_{H^+} < f < f_{ce}$ (f_{ce} — гирочастота электронов). В магнитосфере Земли ЭМИЦ-волны наблюдаются в диапазоне геомагнитных пульсаций $Pc1$ ($0.2\text{--}5$ Гц), а свистовые волны в диапазоне крайне низких и очень низких частот (КНЧ/ОНЧ, $10^2\text{--}10^4$ Гц). Одним из основных параметров, определяющих генерацию этих волн, является поперечная анизотропия температуры частиц. Рост анизотропии и, вследствие этого, рост инкремента циклотронной неустойчивости часто наблюдается при увеличении давления солнечного ветра,

когда магнитосфера сжимается, магнитопауза приближается к Земле, и внутри магнитосферы (особенно на дневной стороне) магнитное поле увеличивается [Olson and Lee, 1983; Anderson and Hamilton, 1993; Cornilleau-Wehrlin et al., 1988]. Увеличение магнитного поля в магнитосфере проявляется на наземных низкоширотных станциях как резкий скачок H -компоненты магнитного поля: sudden impulse (SI), или sudden commencement (SC). Уже в ранних наземных и спутниковых экспериментах было показано, что после SI или SC часто возбуждаются или интенсифицируются (преимущественно с повышением частоты) геомагнитные пульсации в диапазоне $Pc1$ [Saito, 1969; Kangas et al., 1998] и КНЧ/ОНЧ-излучения [Gail et al., 1990; Gail and Inan, 1990].

ЭМИЦ и свистовые волны, генерируемые при резком сжатии магнитосферы, могут вызывать рассеяние заряженных частиц в конус потерь за счет циклотронного взаимодействия и, соответственно, приводить к высыпаниям протонов и электронов в ионосферу, которые наблюдались

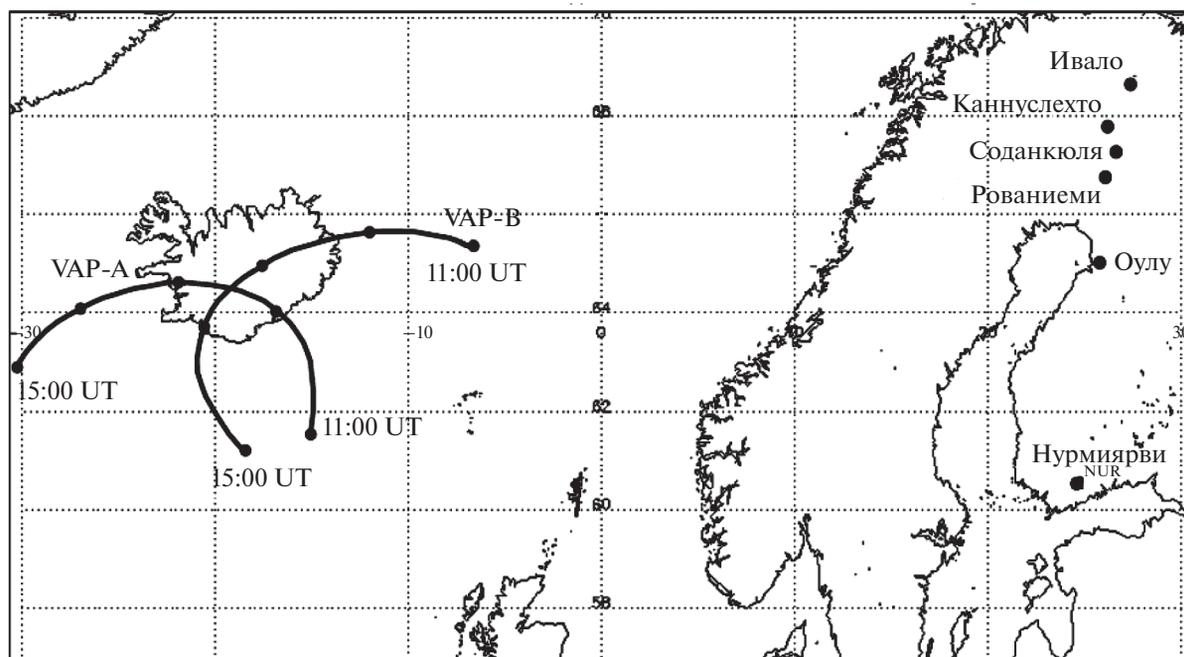


Рис. 1. Траектории спутников Van Allen Probes для интервала 11–15 UT 14 сентября 2017 г. и положение наземных станций в географических координатах.

после SI или SC как по наземным, так и по спутниковым данным [Brown, 1973; Zhang et al., 2008; Попова и др., 2010; Пархомов и др., 2017].

После первоначального резкого сжатия магнитосферы может наблюдаться квазипериодическая последовательность “поджатий” магнитосферы, причиной которых могут быть вариации давления солнечного ветра, волны на магнитопаузе и в магнитосферной полости [например, Cahill and Winckler, 1992; Kerko and Spence, 2003; Archer et al., 2019], которые также приводят к импульсным высыпаниям энергичных электронов и протонов [например, Saito et al., 1974; Manninen et al., 1996; Yahnina et al., 2008].

В данной работе мы рассмотрим событие, произошедшее в интервале 11–15 UT 14 сентября 2017 г., в котором и ЭМИЦ-волны, и волны свистовой моды наблюдались одновременно в магнитосфере и на земной поверхности во время множественных сжатий магнитосферы. Мы анализируем особенности спектров этих излучений и их связь с вариациями магнитного поля в магнитосфере. Измерения магнитного поля, концентрации холодной плазмы, спектров и амплитуд волновых полей использованы для расчета резонансных энергий и коэффициентов диффузии протонов и электронов, которые, в свою очередь, сопоставлены с характеристиками высыпающихся частиц.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Измерения волновых явлений в диапазонах КНЧ/ОНЧ- и ЭМИЦ- волн проводились на спутниках Van Allen Probes (VAP-A и VAP-B) и на земной поверхности. Проекция орбит спутников VAP-A и VAP-B по магнитным силовым линиям показаны на рис. 1 в географических координатах. Ближайшие наземные станции, проводившие наблюдения ОНЧ-волн и геомагнитных пульсаций диапазона $Pc1$, находились в северной Финляндии. Положение станций показано на рис. 1 точками. Видно, что спутники VAP-A и VAP-B находились существенно западнее наземных станций и в проекции на Землю были удалены от них на ~2000 км. Спутники находились в полуденном секторе ($MLT = 11–14$), наземные станции – в послеполуденном секторе ($MLT = 13–16$).

КНЧ/ОНЧ-излучения на ст. Каннуслехто (Kannuslehto, $L = 5.5$) регистрировались в полосе 0.2–39 кГц с помощью двух вертикальных рамочных магнитных антенн, ориентированных в географических направлениях север–юг и восток–запад. Регистрация сигналов на две вертикальные магнитные антенны позволяет определить их поляризацию. Более подробное описание аппаратуры приведено в работе [Manninen, 2005]. Наблюдения геомагнитных пульсаций в диапазоне $Pc1$ проводились на станциях Нурмиярви (Nurmijärvi), Оулу (Oulu), Рованиеми (Rovaniemi), Соданкюля (Sodankylä), Ивало (Ivalo). Станции этой сети, расположенной на $L = 3.3–5.6$, оснащены од-

нотипными индукционными магнитометрами, измерявшими флуктуации магнитного поля с частотой опроса 40 Гц. Описание этой сети можно найти на странице obs. Соданкюля (<http://www.sgo.fi>). Сходные наблюдения ОНЧ-волн и геомагнитных пульсаций проводились и на Кольском полуострове в obs. Ловозеро Полярного геофизического института, но поскольку эта станция расположена дальше к востоку от проекции спутников VAP, чем финские станции, данные obs. Ловозеро здесь не рассматриваются.

Два спутника Van Allen Probes имеют одинаковую высокоэллиптическую орбиту, по которой они двигаются с интервалом примерно 1 ч. Наклонение орбиты спутников 10° , апогей 5.8 радиусов Земли, перигей 700 км, период обращения 9 ч. Измерение электромагнитных волн на этих спутниках проводится прибором EMFISIS (the Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science) на три электрические и три магнитные антенны в диапазоне 0.2–11 кГц для КНЧ/ОНЧ-излучений и на частотах ниже 5 Гц для ЭМИЦ-волн [Kletzing et al., 2013]. В обзорном режиме на борту вычисляются спектральные матрицы ОНЧ-сигналов с временным разрешением 6 с, которые мы и анализируем в данной работе. Вычисление плотности плазмы на спутниках Van Allen Probes проводится двумя способами: из величины плавающего электрического потенциала спутника, определяемого прибором EFW (The Electric Fields and Waves Instruments) [Wygant et al., 2013], и из измерений верхней гибридной частоты [Kurth et al., 2015; Zhelavskaya et al., 2016] по данным прибора EMFISIS.

В период наблюдения волновых явлений на спутниках VAP и на земной поверхности несколько низкоорбитальных спутников серии POES (Polar Orbiting Environmental Satellites) пересекали дневной сектор. Эти спутники (в нашем случае это NOAA-19, MetOp-1, MetOp-2) имеют полярную орбиту с высотой около 800 км и измеряют потоки высыпающихся протонов и электронов в различных энергетических диапазонах. В диапазоне до 20 кэВ прибор TED (Total Energy Detector) измеряет поток энергии протонов и электронов. Потоки протонов и электронов с энергией >30 кэВ измеряются прибором MEPED (Medium Energy Proton and Electron Detector). На достаточно высоких широтах (на которых и проводились наблюдения в нашем событии) прибор TED измеряет частицы в конусе потерь, а прибор MEPED измеряет частицы как в конусе потерь, так и вне его. Детальное описание приборов на спутниках POES и методик измерений потоков частиц дано в работе [Evans and Greer, 2004].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1. Сжатия магнитосферы и наземные наблюдения ОНЧ-излучений и геомагнитных пульсаций

На рисунке 2а, 2б показаны вариации динамического давления солнечного ветра и индекс геомагнитной активности *SYM-H*, который характеризует вариации *H*-компоненты магнитного поля на низкоширотных наземных станциях, за период 10–16 UT 14 сентября 2017 г. Видно, что после 11 UT давление солнечного ветра резко возрастает и остается повышенным около четырех часов. В течение всего этого времени давление солнечного ветра испытывает значительные флуктуации, что, очевидно, приводит к множественным сжатиям магнитосферы. Это вызывает резкое возрастание (~ 20 нТл) *H*-компоненты магнитного поля (SI) в $\sim 11:16$ UT, после которого и до ~ 15 UT в магнитном поле наблюдается серия импульсов с характерными временами 10–20 мин и амплитудами около 10 нТл.

Измерения в диапазонах ОНЧ- и ЭМИЦ-волн, выполненные соответственно на станциях Каннуслахто и Ивало, представлены на рис. 2в, 2г. Видно, что до первого SI геомагнитные пульсации наблюдаются в узкой полосе частот около 0.4 Гц, а после сжатия частота резко повышается, полоса частот расширяется, и амплитуда пульсаций увеличивается. Излучения представляют собой последовательность импульсов (наиболее выраженную в высокочастотной части спектра), коррелирующих с вариациями магнитного поля *SYM-H*.

В ОНЧ-диапазоне наблюдаются во многом подобные изменения в характеристиках излучений. До первого SI на ст. Каннуслахто регистрируются излучения в нижней части спектра с максимумом амплитуды на частотах около 1 кГц; после сжатия частота наблюдаемых излучений резко повышается до 3.5 кГц, и в спектре излучений, особенно в высокочастотной части, отчетливо видны временные импульсные интенсификации амплитуды излучений, подобные вариациям магнитного поля.

Регистрация сигналов на две перпендикулярно ориентированные магнитные рамки на ст. Каннуслахто позволяет измерить поляризацию волн и направление малой оси эллипса поляризации, которое с точностью 180° определяет направление прихода ОНЧ-волн на станцию. Согласно этим данным, которые не приводятся для краткости, во время сжатий магнитосферы ОНЧ-волны с различными частотами приходят на ст. Каннуслахто с различных направлений.

Вариации магнитного поля на спутниках VAP-A и VAP-B в интервале 11–15 UT показаны на рис. 3а. Как уже упоминалось, в это время спутники находились на дневной стороне магнитосферы (MLT = 11–14) вблизи экватора на геомагнитных

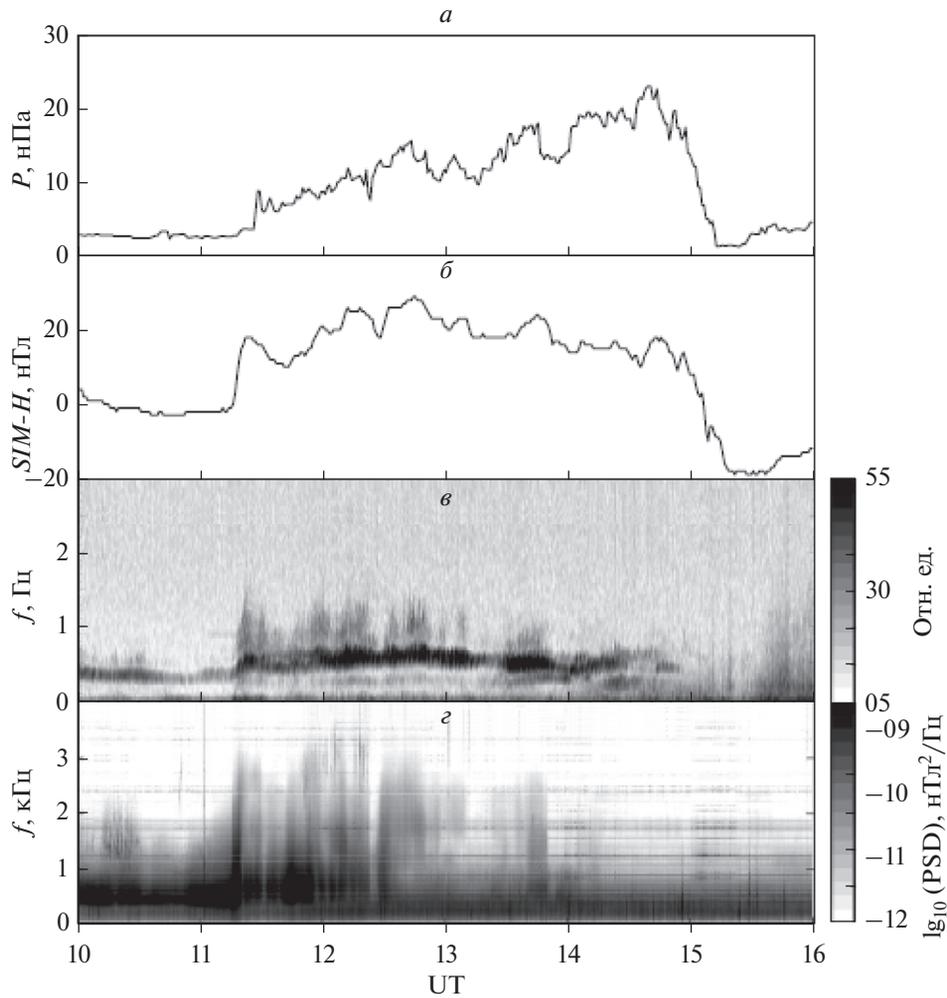


Рис. 2. Вариации динамического давления солнечного ветра (а), SYM-H-индекс (б), геомагнитных пульсаций в диапазоне Pc1 по данным ст. Ивало (в) и спектрограммы КНЧ/ОНЧ-излучений по данным ст. Каннуслехто (г).

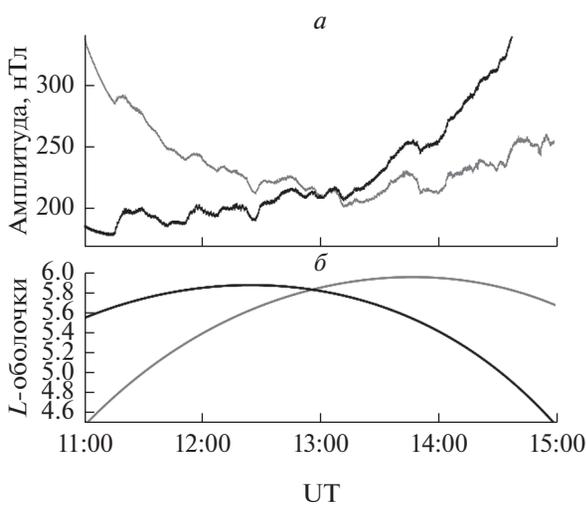


Рис. 3. Вариации амплитуды магнитного поля (а) — на спутниках VAP-A (серая линия) и VAP-B (черная линия); (б) значений параметра L -оболочки для этих спутников в интервале 11–15 UT.

широтах $\lambda = 2^\circ - 10^\circ$ и пересекали L -оболочки $L = 4.4 - 6$ (рис. 3б). В момент первого сжатия магнитосферы на обоих спутниках видно увеличение магнитного поля, причем на спутнике VAP-B, находящемся на больших L -оболочках ($L = 5.7$), скачок магнитного поля более выражен и составлял около 10% от величины земного поля. Кроме того, видно подобие вариаций магнитного поля на обоих спутниках, которые так же явно коррелируют и с вариациями магнитного поля на земной поверхности. Это указывает на глобальный характер наблюдаемых вариаций и позволяет интерпретировать их как проявление множественных сжатий магнитосферы.

3.2. ЭМИЦ-волны и высыпания протонов во время множественных сжатий магнитосферы

В диапазоне Pc1 на спутниках наблюдаются волны ниже гирочастоты протонов f_{H^+} . Интен-

сивность этих волн максимальна в поперечной к фоновому магнитному полю компоненте. Это позволяет отнести наблюдаемые сигналы к ЭМИЦ-волнам. Спектрограмма этих эмиссий приведена на рис. 4б. Гирочастота протонов показана на спектрограмме черной линией, а гирочастоты ионов гелия (f_{He^+}) и кислорода (f_{O^+}) – белыми линиями. Видно, что волны наблюдались как в протонной, так и гелиевой полосе, т.е. на частотах соответственно выше и ниже f_{He^+} . Генерация этих волн носит импульсный характер; всплески излучения коррелируют с вариациями магнитного поля и наблюдаются во время сжатий магнитосферы. ЭМИЦ-волны регистрировались в диапазоне MLT = 11–14. Это означает, что область генерации сигнала может иметь достаточно большую долготную протяженность. Около 11:30 UT ЭМИЦ-волны наблюдались на обоих спутниках, которые находились в это время на $L = 4.5$ и $L = 5.8$. В интервале 14–15 UT ЭМИЦ-волны видны только на спутнике VAP-A ($L \sim 6$) и не наблюдались на VAP-B ($L < 5.5$). Это указывает на значительную изменчивость широтного положения области генерации волн.

Известно, что генерация ЭМИЦ-волн сопровождается рассеянием энергичных ионов по питч-углам, которое приводит к их высыпаниям в ионосферу. Диапазон энергий высыпающихся частиц определяется выполнением условия циклотронного резонанса с волнами. Для оценки скорости питч-угловой диффузии энергичных протонов вблизи конуса потерь с использованием измерений спектров наблюдавшихся ЭМИЦ-волн, данных о концентрации холодной плазмы и величине магнитного поля был рассчитан коэффициент диффузии протонов для малых питч-углов. Использовалось приближение продольного распространения волн по отношению к геомагнитному полю, характерного для ЭМИЦ-волн. Исходные формулы для расчета не приводятся для краткости. Их можно найти, например, в книгах [Беспалов и Трахтенгерц, 1986; Лайонс и Уильямс, 1987]. Методика расчета подробно описана в работе [Попова и др., 2018]. При этом ионный состав фоновой плазмы предполагался следующим: 90% протонов, 6% ионов He^+ и 4% ионов O^+ . Зависимость коэффициента диффузии для протонов разных энергий от времени построена для интервала 11–15:30 UT (рис. 4в). Из рисунка видно, что максимальный коэффициент диффузии соответствует диапазону энергий 10–100 кэВ.

Чтобы проверить, насколько показанные результаты расчетов согласуются с наблюдениями высыпаний протонов, мы рассмотрели данные с нескольких низкоорбитальных спутников POES, пролетавших в рассматриваемый интервал времени через дневной сектор. Пример таких дан-

ных, полученных спутником NOAA-19, показан на рис. 5, где приведены измерения протонов и электронов приборами MEPED и TED. Данные прибора MEPED (измерения потока протонов в диапазоне энергий 80–250 кэВ и 30–80 кэВ) показаны соответственно на рис. 5а, 5б. Видно, что на $L > 8$ потоки изотропны, т.е. поток высыпающихся частиц (толстая линия) здесь примерно равен потоку протонов, захваченных на высоте спутника (тонкая линия). Эта зона высыпаний обычно ассоциируется с овалом протонных сияний и с областью в магнитосфере, где магнитное поле настолько мало, что не обеспечивает адиабатичности движения протонов таких энергий. Высыпания протонов к экватору от границы изотропии, т.е. внутри зоны анизотропных потоков (в нашем примере это высыпания в окрестности $L \sim 5.7$), связывают с рассеянием на ЭМИЦ-волнах [Frey, 2007; Яхнин и др., 2018]. Видно, что поток протонов в канале 30–80 кэВ на порядок больше, чем в канале 80–250 кэВ. Прибор TED, измеряющий поток энергии высыпающихся частиц с энергией < 20 кэВ, также регистрирует высыпания протонов, относящиеся как к зоне изотропии, так и к анизотропной зоне (рис. 5в). Интегральные потоки электронов с энергиями > 100 и > 30 кэВ, а также поток энергии электронов с энергией < 20 кэВ приведены на рис. 5г–5е соответственно. На больших L -оболочках высыпания электронов, измеряемых прибором TED, можно отнести к дневному овалу сияний. Повышенные потоки высыпающихся частиц внутри анизотропной зоны энергичных электронов могут быть связаны с рассеянием на волнах.

На рисунке 6 приведены карты в прямоугольных координатах L -MLT, на которых показаны геомагнитные проекции траекторий спутников в интервале времени 11:00–12:20 UT (слева) и в интервале 12:20–13:40 UT (справа). На картах верхней панели жирной серой линией на траекториях спутников отмечены области высыпания протонов. К сожалению, все пролеты низкоорбитальных спутников в этих интервалах, кроме пролета MetOp-2 в 11:37–11:41 UT, проходили на значительном удалении (порядка двух часов MLT) от проекций спутников VAP, а упомянутый пролет MetOp-2 имел место в то время, когда интенсивность ЭМИЦ-волн и соответственно коэффициент диффузии протонов были очень малы (рис. 4). Тем не менее, сопоставление данных высокоорбитальных и низкоорбитальных спутников имеет смысл и в этом случае, поскольку предполагаемая область интенсификации волн в магнитосфере может иметь значительные долготные размеры [Yahnina et al., 2008]. Рассмотрим данные низкоорбитальных спутников о протонных высыпаниях в течение первого интервала. Для краткости мы будем описывать только области высыпаний и их некоторые характеристики, не приводя сами

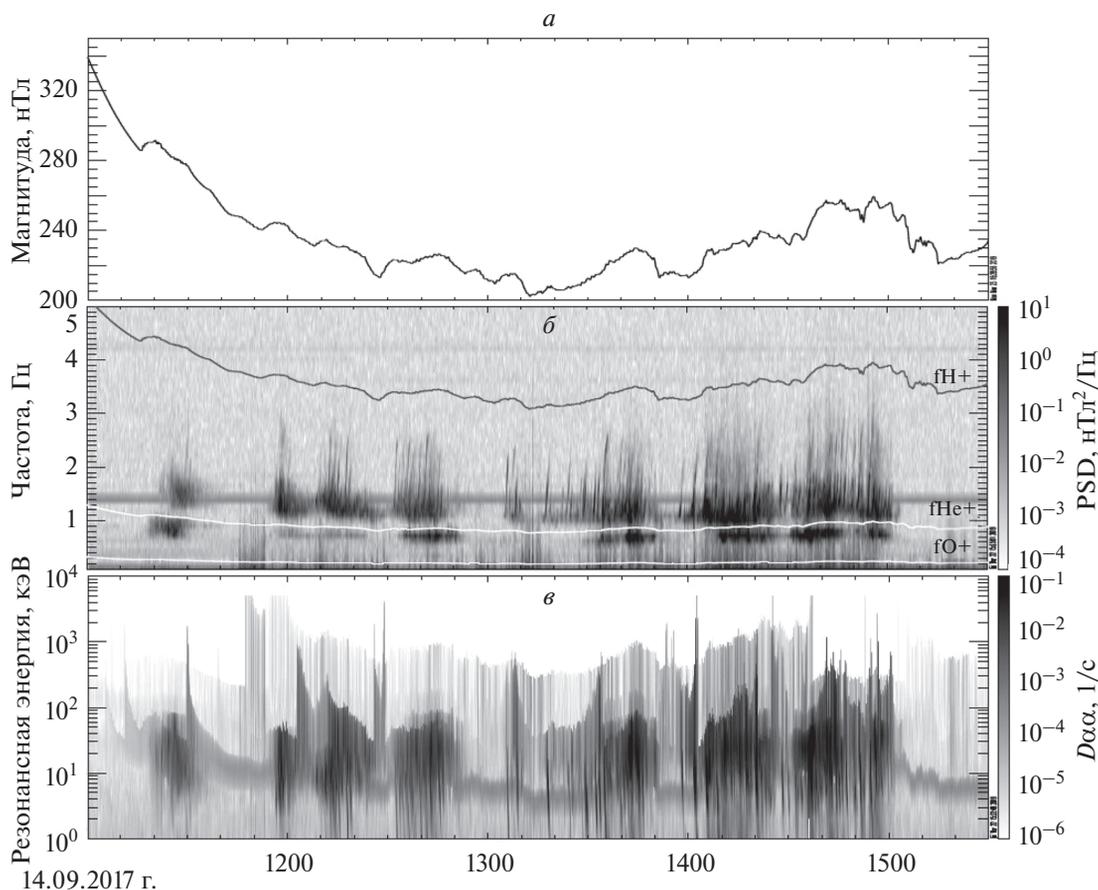


Рис. 4. Верхняя панель (а) – вариации величины магнитного поля на спутнике VAP-A в интервале 11:00–15:30 UT. Средняя панель (б) – спектр ЭМИЦ-волн, измеренных на этом спутнике. Черной линией показана гирочастота протона, белыми линиями – гирочастоты ионов гелия и кислорода. Нижняя панель (в) – зависимость от времени энергетического спектра коэффициента питч-угловой диффузии протонов при их взаимодействии с ЭМИЦ-волнами.

данные. Высыпания протонов с максимальной интенсивностью потока $J = 10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$ в канале 30–80 кэВ были зарегистрированы в ~11:37 UT спутником NOAA-19 на $L = 7-8$ (т.е. к полюсу от проекции спутников VAP). В ~11:39 UT спутник MetOp-2 зарегистрировал высыпание протонов на $L = 4.7$ вблизи проекции спутника VAP-A. Высыпания на MetOp-2 регистрировались прибором MERED только в канале 30–80 кэВ и были довольно слабыми ($J = 10^2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$), что согласуется с малыми значениями коэффициента диффузии в это время. Прибор TED протонных высыпаний не зарегистрировал.

В 12:33:15 UT примерно на широте VAP спутник MetOp-1 зарегистрировал небольшой ($J = 10^2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$) всплеск высыпаний протонов с энергией 30–80 кэВ, а в 12:34–12:35 UT – интенсивные высыпания протонов ($J = 10^4-10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$ в канале 30–80 кэВ) в широком диапазоне энергий. Примерно в 12:42 UT на спутнике NOAA-19 наблюдались высыпания протонов в широком диапазоне энергий, включа-

ющем диапазоны MERED и TED (см. рис. 5). Эти высыпания видны на широте VAP, хотя и на долгом расстоянии около двух часов MLT. В ~13:18 UT тот же спутник наблюдал высыпания ($J > 10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$) примерно на тех же широтах (диапазон энергий протонов при этом не включал частицы, измеряемые прибором TED). Спутник MetOp-2 зарегистрировал протонные высыпания ($J > 10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$) в ~13:20–13:21 UT на $L = 7-8$.

3.3. КНЧ/ОНЧ-излучения и высыпания электронов во время множественных сжатий магнитосферы

В КНЧ/ОНЧ-диапазоне (на частотах < 10 кГц) также наблюдалось подобие временных вариаций мощности сигналов и их спектров в двух спутниках VAP. Поэтому мы проиллюстрируем связь сжатий магнитосферы с характеристиками свистовых волн только по данным спутника VAP-B. На рис. 7а показаны вариации магнитного поля по данным этого спутника в интервале 11–14 UT.

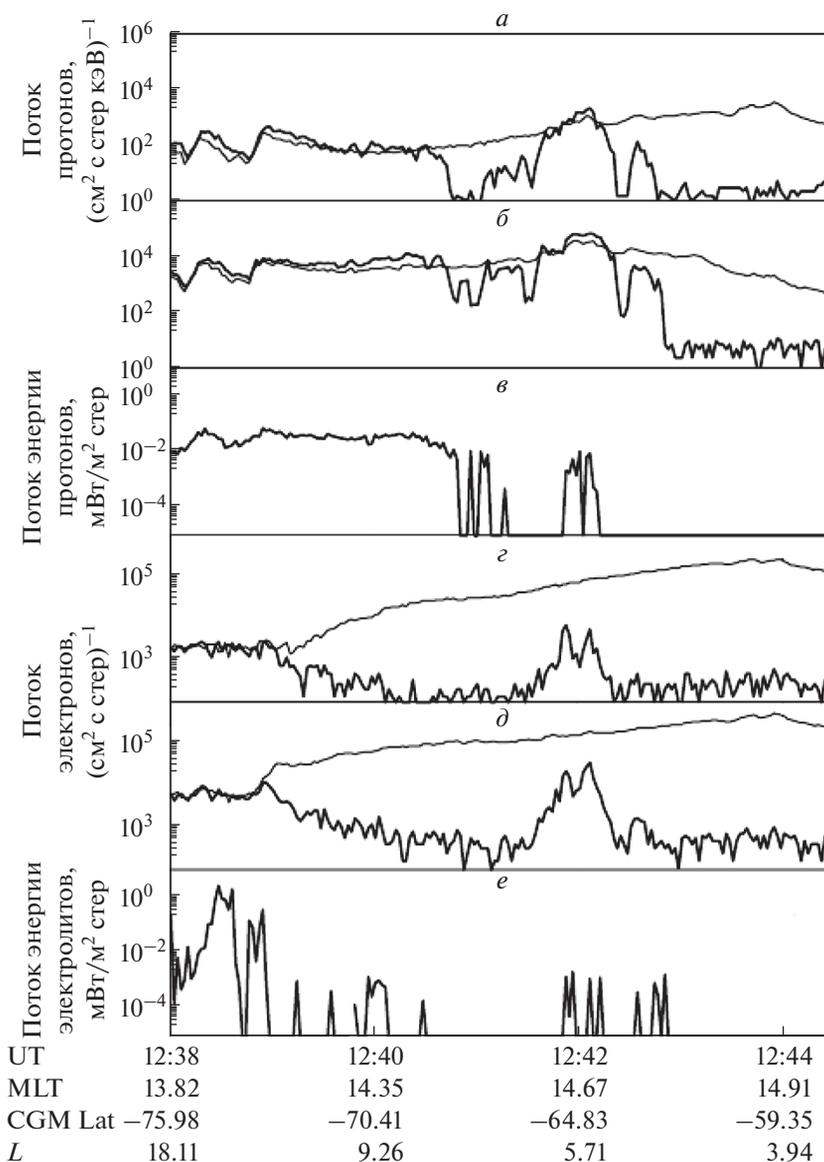


Рис. 5. Данные приборов MERED и TED со спутника NOAA-19 во время пролета через дневной сектор в 12:38–12:44 UT. (а) – дифференциальный поток высыпавшихся (толстая линия) и захваченных (тонкая линия) протонов в канале 80–250 кэВ; (б) – то же самое, но для канала 30–80 кэВ; (в) – поток энергии высыпавшихся протонов с энергией < 20 кэВ; (г) – интегральный поток высыпавшихся (толстая линия) и захваченных (тонкая линия) электронов с энергией > 100 кэВ; (д) – то же самое, но для электронов с энергией > 30 кэВ; (е) – поток энергии высыпавшихся электронов с энергией < 20 кэВ.

Из рисунка 7б, где приведена спектрограмма свистовых волн, зарегистрированных на этом спутнике, следует, что КНЧ/ОНЧ-излучения наблюдались в двух частотных полосах: с максимумом интенсивности ниже 1 кГц (КНЧ-излучения) и на частотах выше 2 кГц (ОНЧ-излучения). Сигналы в этих полосах по-разному реагируют на вариации магнитного поля, показанные на рис. 7а. Излучения выше 2 кГц наблюдаются сразу после первого SI (этот момент обозначен вертикальной линией) и до 14 UT на частотах вблизи половины локальной гирочастоты электронов ($f \sim 0.5f_{ce}$), ко-

торая обозначена черной линией. Вариации интенсивности этих излучений коррелируют с вариациями магнитного поля. Шумовые КНЧ-излучения наблюдались на обоих спутниках и до первого SI, а сразу после SI их интенсивность резко уменьшилась. Слабые КНЧ-излучения вновь появились на короткое время около 11:30 UT, а около 12:28 UT в связи с очередным сжатием магнитосферы (этот момент показан вертикальной пунктирной линией) они вновь интенсифицировались и регистрировались до $\sim 13:20$ UT.

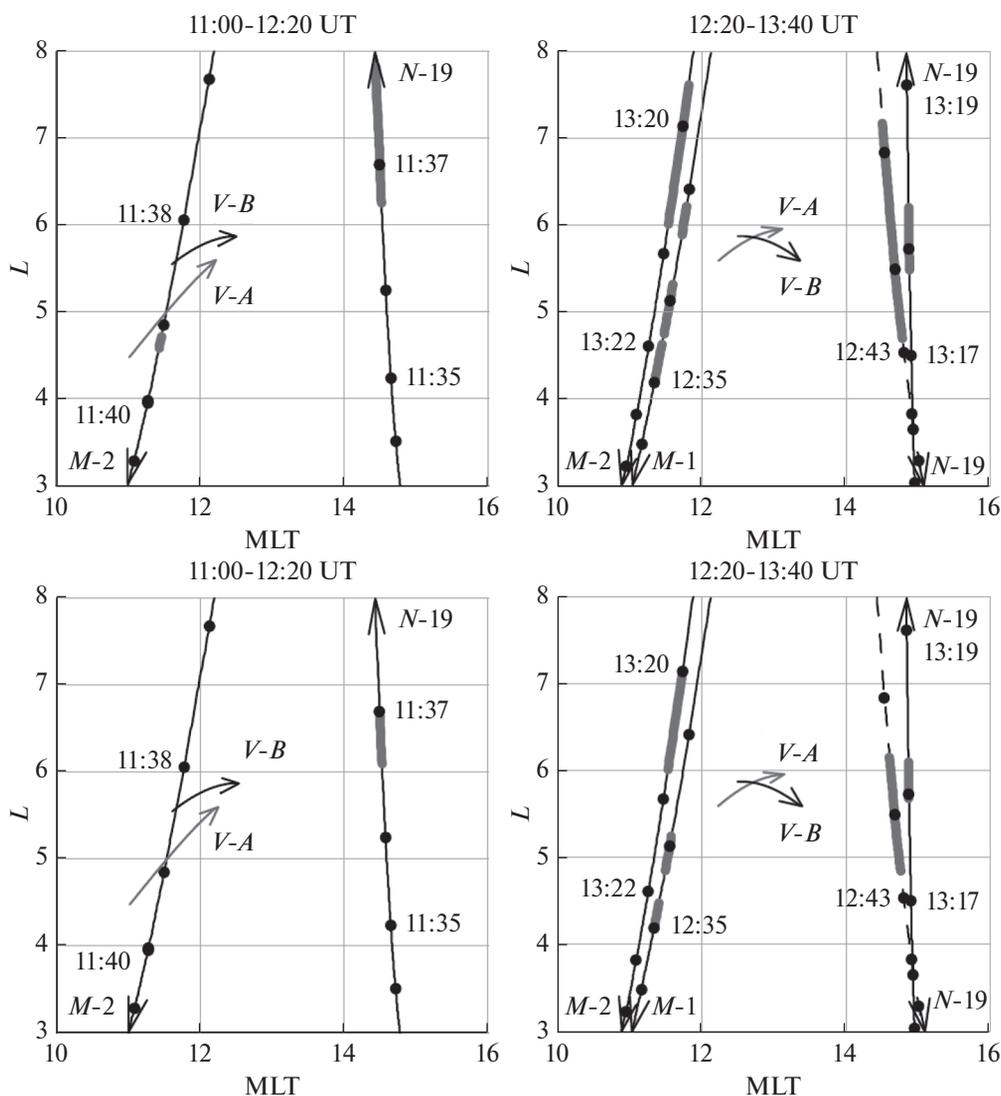


Рис. 6. Карты пролетов спутников POES и VAP в координатах MLT – L в интервалах 11:00–12:20 UT и 12:20–13:40 UT. Линии со стрелками показывают траектории спутников VAP (V-A и V-B), NOAA-19 (N-19), MetOp-1 (M-1) и MetOp-2 (M-2). Стрелки указывают направление движения. Пунктирной линией отмечен пролет в южном полушарии. Черными точками на траекториях отмечены минутные интервалы. Рядом с траекториями POES указано время пролета. Серыми толстыми линиями отмечены участки траекторий, на которых наблюдались высыпания протонов (верхняя панель) и электронов (нижняя панель).

Анализ многокомпонентных измерений (данные не показаны) позволяет сделать вывод, что КНЧ- и ОНЧ-волны, усилившиеся после первого SI, распространялись от экватора с малыми углами волнового вектора ($<20^\circ$) по отношению к магнитному полю. Этот факт свидетельствует в поддержку циклотронного механизма генерации КНЧ/ОНЧ-волн в рассматриваемом событии. Действительно, при развитии циклотронной неустойчивости область генерации свистовых волн находится в области экватора, а инкремент максимален для волн, распространяющихся вдоль магнитного поля.

Аналогично тому, как это было сделано для протонов, для оценки эффективности взаимодействия электронов разных энергий с КНЧ/ОНЧ-волнами, наблюдаемыми на спутниках VAP при сжатиях магнитосферы, был рассчитан коэффициент питч-угловой диффузии энергичных электронов $D_{\alpha\alpha}$ по измеренным на спутниках частотно-амплитудным характеристикам свистовых волн, концентрации холодной плазмы и величине магнитного поля. Результат расчета для волновых и плазменных параметров, измеренных на спутнике VAP-B, приведен на рис. 7в; черной линией показаны резонансные энергии для волн с частотой $0.5f_{ce}$. Видно, что после сжатия магни-

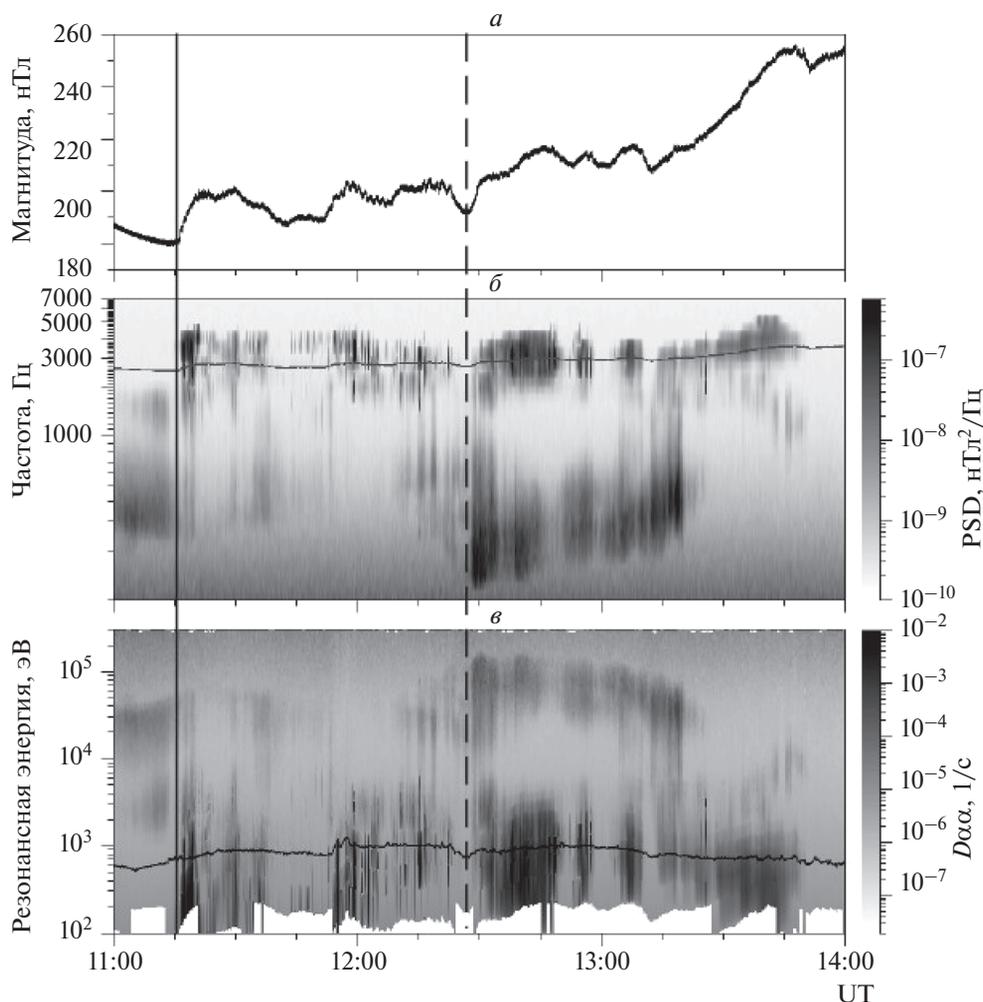


Рис. 7. Верхняя панель (а) — вариации магнитного поля на спутнике VAP-B в интервале 11–14 UT. Средняя панель (б) — спектрограмма КНЧ/ОНЧ-волн, измеренных на спутнике VAP-B. Черной линией показана частота $0.5f_{ce}$. Нижняя панель (в) — зависимость от времени энергетического спектра коэффициента питч-угловой диффузии электронов при их взаимодействии с КНЧ/ОНЧ-волнами.

тосферы величина $D\alpha\alpha$ имеет два выраженных максимума по энергиям: в области низких энергий (0.1–1 кэВ) и высоких энергий (10–100 кэВ). Из сопоставления рис. 7в и 7б ясно, что ОНЧ-излучения на частотах вблизи $0.5f_{ce}$ могут обеспечивать рассеяние по питч-углам низкоэнергичных (0.1–1 кэВ) электронов, а КНЧ-излучения, наблюдавшиеся на частотах ниже 1 кГц во временном интервале 12:30–13:20 UT, могут вызывать рассеяние и соответственно высыпания в ионосферу энергичных 10–100 кэВ электронов.

Области высыпаний электронов показаны на картах нижней панели рис. 6. Участки траекторий спутников POES, где наблюдались высыпания энергичных электронов с $E > 30$ кэВ, показаны жирными серыми линиями. Видно, что в окрестности проекций магнитосферных спутников до начала регистрации интенсивных КНЧ-излуче-

ний (интервал 11:00–12:20 UT) высыпания энергичных электронов на спутниках POES не регистрировались (за исключением небольшого локализованного участка траектории спутника NOAA-19 около 11:37 UT, где поток частиц составил $\sim 10^4$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ стер $^{-1}$). На пролетах POES, имевших место во время наблюдения КНЧ-волн на спутниках VAP (интервал 12:20–13:40 UT), регистрируются потоки высыпающихся энергичных электронов 10^4 – 10^5 см $^{-2}$ с $^{-1}$ стер $^{-1}$ в широкой по MLT области. Спутник NOAA-19 зарегистрировал высыпания электронов на MLT = 14–15, а спутники MetOp-1 и MetOp-2 на MLT = 11–12 в широком диапазоне L -оболочек, включающем и L -оболочки спутников VAP, наблюдавших КНЧ-волны. Таким образом, можно предположить, что КНЧ-излучения, которые обеспечивают увеличение коэффициента диффузии (см. рис. 7в) на энергиях ~ 10 –100 кэВ, могут быть ответственные

за высыпания энергичных электронов, наблюдаемые на низколетящих спутниках POES.

Что касается высыпаний низкоэнергичных (от долей до нескольких кэВ) электронов, которые могли быть связаны с рассеянием на ОНЧ-волнах на частотах >2 кГц, то заметных потоков таких частиц зарегистрировать на спутниках POES не удалось, хотя иногда признаки таких высыпаний видны в данных прибора TED (см. рис. 5).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Особенности спектров волн на земной поверхности

Спектры пульсаций $Pc1$ во время рассматриваемого события можно отнести к “всплескам гиромангнитных эмиссий” (по терминологии Fukushima et al. [1981]), которые наблюдаются наземными станциями на дневной стороне во время SI. Одновременные наблюдения спектров таких эмиссий во внешней дневной магнитосфере и на наземной станции были опубликованы в работе [Anderson et al., 1996], где была показана их почти полная идентичность. В работе [Yahnina et al., 2008] продемонстрирована тесная связь спектров таких пульсаций с динамикой протонных сияний (протонных высыпаний) к экватору от овала сияний на дневной стороне. Протонные сияния позволили визуализировать область источника (ионо-циклотронной неустойчивости).

В рассмотренном здесь событии на земной поверхности пульсации в диапазоне $Pc1$ так же, как и на спутниках, имеют импульсный характер, но вид спектра несколько отличается от спектра эмиссий на спутниках. Наиболее выражены излучения в диапазоне 0.5–0.8 Гц, которые можно отождествить с гелиевой полосой, наблюдаемой на спутниках. Вероятно, большая интенсивность гелиевой полосы на земной поверхности может быть объяснена лучшими условиями распространения сигнала из магнитосферы к ионосфере, поскольку волны с частотами выше f_{He^+} могут отражаться от областей гирорезонанса с тяжелыми ионами. Кроме того, различия в форме спектров, в частности, более низкие значения верхней частоты в водородной полосе, могут быть связаны с плохим сопряжением спутников VAP и наземных станций. Обычно вариации сигнала на наземной станции хорошо соответствуют динамике источника в тех случаях, когда долготы станции и источника близки. В нашем случае различия по долготе между областями наблюдения волн в магнитосфере и на земной поверхности достигали 2–3 часов MLT, поэтому возможно, что сигнал на земной поверхности отражает особенности того источника, который расположен ближе к меридиану станции.

Широтное расположение источника ЭМИЦ-волн, которое следует из их наблюдений на спутниках VAP и наблюдений протонных высыпаний на спутниках POES, согласуется с тем, что интенсивность сигнала на земной поверхности была максимальной на станциях Ивало, Соданкюля и Рованиеми ($L = 5.6, 5.2$ и 4.9) и уменьшалась на более экваториальных станциях Оулу ($L = 4.5$) и Нурмиярви ($L = 3.3$) (данные не показаны).

Излучения в КНЧ/ОНЧ-диапазоне, зарегистрированные на ст. Каннуслехто и на спутниках VAP, имеют импульсный характер, их временные вариации подобны и связаны с вариациями магнитного поля. Однако спектры излучения на земной поверхности и на спутниках имели существенные различия. На спутниках волны регистрировались в двух полосах: 0.1–1 кГц и на частотах 2–5 кГц вблизи $0.5f_{ce}$. На наземной станции в диапазоне частот 0.5–3.5 кГц при сжатиях магнитосферы наблюдалась одна полоса КНЧ/ОНЧ-шума, амплитуда которого уменьшалась к большим частотам. Более узкий диапазон КНЧ/ОНЧ-волн на Земле может быть связан с особенностями распространения в магнитосфере и ионосфере свистовых волн, только малая часть которых способна выйти к Земле. Например, в работе [Титова и др., 2017] сравнение узкополосных ОНЧ-излучений, регистрировавшихся одновременно на спутниках VAP и в Каннуслехто показало, что на Земле регистрировались только ОНЧ-излучения, каналированные на плазмопаузе и в крупномасштабных неоднородностях повышенной плотности с поперечным размером $\sim 10^3$ км. Отсутствие на земле КНЧ-волн на частотах ниже 0.5 кГц, вероятно, связано с их отражением от области протонного гирорезонанса в верхней ионосфере. Другая существенная причина несоответствия спектров излучений на спутнике и на Земле во время сжатий магнитосферы обусловлена, по-видимому, присутствием нескольких разнесенных в пространстве источников КНЧ/ОНЧ-излучений. Это следует из данных ст. Каннуслехто, которые показывают, что волны на различных частотах, связанные со сжатиями, приходили на приемную антенну с различных направлений.

4.2. Связь волн с высыпаниями

Особенности протонных высыпаний на дневной стороне во время сжатия магнитосферы и связь этих высыпаний с ЭМИЦ-волнами уже рассматривались по данным наблюдений протонных сияний со спутника IMAGE [например, Zhang et al., 2008; Попова и др., 2010]. Обычно это короткий (несколько минут) всплеск высыпаний протонов в субавроральной области, имеющий размеры в несколько градусов по широте и несколько часов MLT по долготе, сопровождающийся либо всплеском эмиссий в диапазоне

пульсаций $Pc1$, либо резким ростом частоты и интенсивности уже существующих излучений. В работе [Yahnina et al., 2008], где также рассматривался случай множественных сжатий магнитосферы, было показано, что область развития ионно-циклотронной неустойчивости в дневной магнитосфере весьма изменчива в пространстве и во времени и может иметь для каждого импульса размеры до 10 градусов по широте и до нескольких часов по MLT (см. рис. 1 в указанной работе). Из приведенных в нашей работе данных (см. рис. 6, интервал 12:20–13:40 UT) также следует, что область протонных высыпаний, зарегистрированная на близких по времени пролетах низкоорбитальных спутников, может иметь большие пространственные размеры (см. пролеты MetOp-1, который около 12:34 UT был на MLT = 11, и NOAA-19, который около 12:40 UT был на MLT = 15, или пролеты NOAA-19 и MetOp-2 около 13:18 и 13:20 UT соответственно). При этом видно, что широтное положение областей высыпаний изменчиво. Это согласуется с результатами работы [Yahnina et al., 2008]. К сожалению, дискретность пролетов низкоорбитальных спутников не позволяет рассмотреть динамику высыпаний в деталях.

Такая пространственно-временная структура во время сжатия магнитосферы характерна не только для протонных высыпаний, но и для высыпаний электронов. Более того, из сравнения верхней и нижней панелей на рис. 6 ясно, что довольно часто могут наблюдаться одновременные высыпания протонов и электронов из одной области. Подобное совпадение областей одновременной генерации ОНЧ- и ЭМИЦ-волн описано в работе [Remya et al., 2015] по данным спутника Cassini, пролетавшего в дневной магнитосфере в условиях высокого давления солнечного ветра.

На спутнике VAP-B увеличение магнитного поля во время первого SI (~11:16 UT) составляло ~20 нТл, т.е. около 10% от величины геомагнитного поля, а существенные высыпания энергичных электронов на спутниках POES наблюдались только после заметно меньшего увеличения магнитного поля (~10 нТл) на спутниках в ~12:30 UT. Именно после этого момента на обоих спутниках начали регистрироваться КНЧ-волны относительно большой амплитуды на частотах 0.1–1 кГц. В это время коэффициенты диффузии, рассчитанные для измеренных на спутниках VAP величин магнитного поля и концентрации холодной плазмы, имели максимумы на энергиях 10–100 кэВ. Поэтому мы полагаем, что именно КНЧ-волны были ответственны за высыпания энергичных электронов, наблюдаемых на спутниках POES. Возможность эффективного взаимодействия энергичных электронов именно с КНЧ-волнами (с плазмосферными шипениями) отмечалась в литературе [например, Titova et al., 1998; Meredith et al., 2004; Li et al., 2015]. В нашей работе, по-ви-

димому, впервые, проведена идентификация КНЧ-волн с частотами 0.1–1 кГц как причины высыпаний электронов с энергиями >30 кэВ в дневном секторе во время сжатия магнитосферы.

Для излучений на частотах 2–4 кГц вблизи $0.5f_{ce}$ резонансные энергии и максимумы коэффициента диффузии лежат в диапазоне от сотен эВ до нескольких кэВ. Соответственно, во время сжатия магнитосферы можно ожидать высыпания электронов с такими энергиями. Высыпания электронов с энергией ~1 кэВ в дневной области на широтах экваториальнее овала, связанные со сжатием магнитосферы, описаны в работе [Liou et al., 2002] по данным спутников Polar и DMSP. В этой работе высказано предположение, что такие высыпания могут быть вызваны рассеянием на свистовых волнах. Высыпания электронов с энергиями порядка 1 кэВ, сопряженные со вспышкой протонных сияний во время сжатия магнитосферы, были отмечены в работе [Zhang et al., 2002] также по данным спутников DMSP.

В нашем случае, несмотря на то, что интенсификации излучения вблизи $0.5f_{ce}$ были видны в течение всего интервала наблюдений, спутники POES регистрировали очень слабые высыпания низкоэнергичных электронов (см. например, рис. 5), при этом они наблюдались далеко не в каждом пролете. Возможно, это связано с низкой чувствительностью прибора TED. К сожалению, данных со спутников DMSP, подходящих для анализа данного события, мы не нашли.

5. ВЫВОДЫ

Рассмотрено событие в интервале 11–15 UT 14 сентября 2017 г., во время которого на спутниках VAP-A и VAP-B, находящихся в дневном секторе (~11–14 MLT) вблизи экваториальной плоскости на $L \approx 4–6$, регистрировались существенные (до 10%) увеличения магнитного поля, связанные с множественными сжатиями магнитосферы.

Интенсификации свистовых волн, коррелировавшие с вариациями магнитного поля, наблюдались на спутниках VAP в ОНЧ-диапазоне на частотах 2–6 кГц (вблизи $0.5f_{ce}$) и в КНЧ-диапазоне 0.1–1 кГц. Подобные интенсификации наблюдались и на частотах 0.5–1.5 Гц в протонной и гелиевой полосах ЭМИЦ-волн.

По данным о спектре волн рассчитаны коэффициенты питч-угловой диффузии электронов и протонов (предполагалось продольное распространение волн). Показано, что коэффициенты диффузии электронов имели два максимума: на энергиях около 0.1–1 кэВ, обусловленный ОНЧ-волнами на частотах 2–6 кГц, и на энергиях 10–100 кэВ, обусловленный КНЧ-волнами с частотами 0.1–1 кГц. Коэффициент диффузии

протонов имел максимум в диапазоне энергий 10–100 кэВ.

Одновременно с наблюдением КНЧ-волн в диапазоне 0.1–1 кГц в магнитосфере и на земной поверхности низкоорбитальные спутники POES регистрировали высыпания электронов с энергиями >30 кэВ, что согласуется с расчетами коэффициента диффузии на этих волнах. Признаки высыпания низкоэнергичных электронов, соответствующих резонансным энергиям ОНЧ-волн вблизи $0.5f_{ce}$, наблюдались лишь эпизодически. С ЭМИЦ-волнами тесно связаны высыпания протонов в диапазоне рассчитанных резонансных энергий (10–100 кэВ).

Спектры ЭМИЦ- и ОНЧ-волн на земной поверхности также имеют вид всплесков, коррелирующих с наблюдавшимися сжатиями магнитосферы. Отличия частотных характеристик спектров, измеренных на земной поверхности, от наблюдавшихся на спутниках, по-видимому, связаны с отсутствием сопряженности наземных и спутниковых наблюдений и наличием во время сжатий магнитосферы множества разнесенных в пространстве источников. На последнее указывает также анализ спутниковых измерений высыпаний частиц и многокомпонентных измерений ОНЧ-волн на ст. Каннслехто.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят создателей спутников Van Allen Probes и разработчиков инструментов за возможность свободного использования данных (EMFISIS — Крэйг Клетцинг, EFW — Джон Вайгант) и NOAA за свободный доступ к данным спутников POES на сайте (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/dataaccess.html>). Информация о давлении солнечного ветра и индексе *SYM-H* получена из базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа А. Яхнина, Е. Титовой, А. Демехова, Т. Попова, А. Любич по анализу данных спутников Van Allen Probes и расчетам коэффициентов питч-угловой диффузии выполнена при поддержке Российского научного фонда грант № 15-12-20005. Обработка данных наземных наблюдений выполнена при поддержке Академии наук Финляндии (грант № 315716). Работа Т. Яхнина по анализу данных спутников POES выполнена в рамках госзадания № АААА-А 18-118012490100-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Андронов А.А., Трахтенгерц В.Ю. Кинетическая неустойчивость радиационных поясов Земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 4. № 2. С. 233–242. 1964.

— Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Альфвеновские маэзеры. Горький: ИПФ АН СССР. 191 с. 1986.

— Лайонс Л., Уильямс Д. Физика магнитосферы. Количественный подход. М.: Мир. 312 с. 1987.

— Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Яхнин А.Г., Суворова А.В., Пашинин А.Ю., Козелов Б.В. Глобальный импульсный всплеск геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2–5 Гц как предвестник внезапного начала геомагнитной бури св. Патрика 17 марта 2015 г. // Космич. исслед. Т. 55. № 5. С. 321–334. 2017. <https://doi.org/10.1134/S0010952517050070>

— Попова Т.А., Яхнин А.Г., Яхнина Т.А., Фрей Х. Взаимосвязь между скачками динамического давления солнечного ветра, вспышками протонных сияний и геомагнитными пульсациями в диапазоне Pc1 // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 5. С. 595–602. 2010. <https://doi.org/10.1134/S0016794018040119>

— Попова Т.А., Любич А.А., Демехов А.Г., Яхнин А.Г. Питч-угловая диффузия энергичных протонов при их взаимодействии с ЭМИЦ волнами: сравнение результатов расчетов с данными спутников THEMIS и NOAA/POES // Тр. Кольского научного центра РАН. Гелиогеофизика. Выпуск № 4. Т. 5. № 9. С. 45–52. 2018. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.45-52>

— Титова Е.Е., Демехов А.Г., Маннинен Ю., Пасманик Д.Л., Ларченко А.В. Локализация источников узкополосных шумовых ОНЧ-излучений в диапазоне 4–10 кГц по результатам одновременных наблюдений на Земле и на спутниках Van Allen Probes // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 57. № 6. С. 760–773. 2017. <https://doi.org/10.7868/S001679401706013X>

— Яхнин А.Г., Яхнина Т.А., Семенова Н.В., Попова Т.А., Демехов А.Г. Протонные сияния к экватору от овала как проявление ионно-циклотронной неустойчивости в магнитосфере Земли (краткий обзор) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 5. С. 599–607. 2018. <https://doi.org/10.1134/S0016794018050176>

— Anderson B.J., Hamilton D.C. Electromagnetic ion cyclotron waves stimulated by modest magnetospheric compressions // J. Geophys. Res. V. 98. P. 11369–11382. 1993. <https://doi.org/10.1029/93JA00605>

— Anderson B.J., Erlandson R.E., Engebretson M.J., Alford J., Arnoldy R.L. Source region of 0.2 to 1.0 Hz geomagnetic pulsation bursts // Geophys. Res. Lett. V. 23. P. 769–772. 1996. <https://doi.org/10.1029/96GL00659>

— Archer M.O., Hietala H., Hartinger M.D., Plaschke F., Angelopoulos V. Direct observations of a surface eigenmode of the dayside magnetopause // Nature Communications. V. 10. P. 1–11. 2019. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08134-5>

— Brown R.R. A study of ionospheric absorption in conjugate regions produced by storm sudden commencements and sudden impulses in the geomagnetic field // J. Geophys. Res. V. 78. P. 1668–1672. 1973.

— Cahill Jr.L.J., Winckler J.R. Periodic magnetopause oscillations observed with the GOES satellites on March 24, 1991 // J. Geophys. Res. V. 97. № A6. P. 8239–8243. 1992. <https://doi.org/10.1029/92JA00433>

— Cornilleau-Wehrlin N., Solomon J., Korth A., Kremser G. Non-stationary effects in wave-particle interactions during

- storm sudden commencements (SSC) // *Physica Scripta*. V. 37. P. 437–442. 1988.
- *Cornwall J.M.* Cyclotron instabilities and electromagnetic emission in the ultra low frequency and very low frequency ranges // *J. Geophys. Res.* V. 70. № 1. P. 61–69. 1965. <https://doi.org/10.1029/JZ070i001p00061>
- *Evans D.S., Greer M.S.* Polar orbiting environmental satellite space environment monitor-2: Instrument descriptions and archive data documentation // NOAA Tech. Memo 1.4, Boulder, Colorado: NOAA OARL Space Environment Center, 2004.
- *Frey H.U.* Localized aurora beyond the auroral oval // *Rev. Geophys.* V. 45. RG1003. 2007. <https://doi.org/10.1029/2005RG000174>
- *Fukunishi H., Toya T., Koike K., Kuwashima M., Kawamura M.* Classification of hydromagnetic emission based on frequency-time spectra // *J. Geophys. Res.* V. 86. P. 9029–9039. 1981. <https://doi.org/10.1029/JA086iA11p09029>
- *Gail W.B., Inan U.S., Helliwell R.A., Carpenter D.L., Krishnaswamy S., Rosenberg T.J., Lanzerotti L.J.* Characteristics of wave-particle interactions during sudden commencements. 1. Ground-based observations // *J. Geophys. Res.* V. 95. P. 119–137. 1990.
- *Gail W.B., Inan U.S.* Characteristics of wave-particle interactions during sudden commencements: 2. Spacecraft observations // *J. Geophys. Res.* V. 95. № A1. P. 139–147. 1990. <https://doi.org/10.1029/ja095ia01p00139>
- *Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O.* Morphology and physics of short-period magnetic pulsations // *Space Science Reviews*. V. 83. P. 435–512. 1998.
- *Kennel C.F., Petschek H.E.* Limit of stably trapped particle fluxes // *J. Geophys. Res.* V. 71. № 1. P. 1–28. 1966.
- *Kepko L., Spence H.E.* Observations of discrete, global magnetospheric oscillations directly driven by solar wind density variations // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A6. 1257. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009676>
- *Kletzing C.A., Kurth W.S., Acuna M. et al.* The electric and magnetic field instrument suite and integrated studies (EMFISIS) on RBSP // *Space Sci. Rev.* V. 179. № 1–4. P. 127–181. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9993-6>
- *Kurth W.S., De Pascuale S., Faden J.D., Kletzing C.A., Hospodarsky G.B., Thaller S., Wygant J.R.* Electron densities inferred from plasma wave spectra obtained by the Waves instrument on Van Allen Probes // *J. Geophys. Res.* – *Space*. V. 120. P. 904–914. 2015. <https://doi.org/10.1002/2014JA020857>
- *Li H., Yuan Z., Yu X., Huang S., Wang D., Wang Z., Qiao Z., Wygant J.R.* The enhancement of cosmic radio noise absorption due to hiss driven energetic electron precipitation during substorms // *J. Geophys. Res.* – *Space*. V. 120. P. 5393–5407. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015JA021113>
- *Liou K., Wu C.-C., Lepping R.P., Newell P.T., Meng C.-I.* Midday sub-auroral patches (MSPs) associated with interplanetary shocks // *Geophys. Res. Lett.* V. 29. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001GL014182>
- *Manninen J.* Some aspects of ELF–VLF emissions in geophysical research. Sodankylä Geophys. Obs. Publ. no.98. Oulu Univ. Finland. 2005. <http://www.sgo.fi/Publications/SGO/thesis/ManninenJyrki.pdf>
- *Manninen J., Turunen T., Lubchich A., Titova E., Yahnina T.* Relations of VLF emissions to impulsive electron precipitation measured by EISCAT radar in the morning sector of auroral oval // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 58. № 1–4. P. 97–106. 1996.
- *Meredith N.P., Horne R.B., Thorne R.M., Summers D., Anderson R.R.* Substorm dependence of plasmaspheric hiss // *J. Geophys. Res.* V. 109. A06209. 2004. <https://doi.org/10.1029/2004JA010387>
- *Olson J.V., Lee L.C.* Pc1 wave generation by sudden impulses // *Planet. Space Sci.* V. 31. P. 295–302. 1983.
- *Remya B., Tsurutani B.T., Reddy R.V., Lakhina G.S., Hajra R.* Electromagnetic cyclotron waves in the dayside subsolar outer magnetosphere generated by enhanced solar wind pressure: EMIC wave coherency // *J. Geophys. Res.* – *Space*. V. 120. P. 7536–7551. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015JA021327>
- *Saito T.* Geomagnetic pulsations // *Space Sci. Rev.* V. 10. № 3. P. 319–412. 1969.
- *Saito T., Takahashi F., Morioka A., Kuwashima M.* Fluctuations of electron precipitation to the dayside auroral zone modulated by compression and expansion of the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* V. 22. № 6. P. 939–953. 1974.
- *Titova E.E., Yahnina T.A., Yahnin A.G. et al.* Strong localized variations of the low-altitude energetic electron fluxes in the evening sector near the plasmopause // *Ann. Geophys.* V. 16. P. 25–33. 1998. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-0025-2>
- *Wygant J.R., Bonnell J.W., Goetz K. et al.* The electric field and waves instruments on the Radiation Belt Storm Probes mission // *Space Sci. Rev.* V. 179. № 1–4. P. 183–220. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-0013-7>
- *Yahnina T.A., Frey H.U., Bösinger T., Yahnin A.G.* Evidence for subauroral proton flashes on the dayside as the result of the ion-cyclotron interaction // *J. Geophys. Res.* 113. A07209. 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JA013099>
- *Zhang Y., Paxton L.J., Immel T.J., Frey H.U., Mende S.B.* Sudden solar wind dynamic pressure enhancements and dayside detached auroras: IMAGE and DMSP observations // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A4. 8001. 2002. <https://doi.org/10.1029/2002JA009355>
- *Zhang Y., Paxton L.J., Zheng Y.* Interplanetary shock induced ring current auroras // *J. Geophys. Res.* V. 113. A01212. 2008.
- *Zhelavskaya I.S., Spasojevic M., Shprits Y.Y., Kurth W.S.* Automated determination of electron density from electric field measurements on the Van Allen Probes spacecraft // *J. Geophys. Res.* – *Space*. V. 121. P. 4611–4625. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JA022132>