УДК 550.385.37:537.8:533.951.3

ПРОТОННЫЕ ВЫСЫПАНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫЕ ВОЛНЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ СУББУРЕВОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ

© 2021 г. Т. А. Попова^{1, *}, А. Г. Демехов¹, А. Г. Яхнин¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия *E-mail: tarkada@yandex.ru Поступила в редакцию 25.09.2020 г. После доработки 20.10.2020 г. Принята к публикации 27.11.2020 г.

На примере отдельного события проанализировано соотношение между параметрами электромагнитных ионно-циклотронных волн в магнитосфере Земли и параметрами захваченных и высыпающихся ионов кольцевого тока. Показано соответствие наблюдаемых энергий и степени изотропии потоков протонов на малых высотах результатам расчетов коэффициента питч-угловой диффузии по данным о параметрах ионно-циклотронных волн.

DOI: 10.31857/S0367676521030212

введение

Развитие суббури оказывает большое влияние на динамику процессов, происходящих в магнитосфере Земли. Одним из важных факторов суббуревой активности является инжекция частиц горячей плазмы из хвоста во внутреннюю магнитосферу. В ходе магнитного дрейфа такие частицы формируют кольцевой ток и пополняют радиационные пояса. Протоны кольцевого тока могут вступать в резонансное взаимодействие с электромагнитными ионно-циклотронными (ЭМИЦ) волнами. При благоприятных условиях (наличие поперечной питч-угловой анизотропии и повышенных потоков энергичных протонов, достаточно высокая концентрация холодной плазмы [1]) это взаимодействие приводит к развитию ионно-циклотронной (ИЦ) неустойчивости. В этом случае интенсивность ЭМИЦ волн нарастает, а поперечная энергия протонов уменьшается, что приводит к их попаданию в конус потерь и высыпанию в атмосферу. Такие высыпания являются одним из механизмов потерь частиц кольцевого тока.

Процесс взаимодействия ЭМИЦ волн с протонами кольцевого тока исследовался во многих работах, например, [2, 3]. Как правило, используется квазилинейная теория [4, 5], предполагающая диффузионное движение частиц в пространстве скоростей и, в частности, диффузию по питч-углам. Важную информацию об этом процессе можно получить из сопоставления данных магнитосферных и низкоорбитальных спутников [6–8].

В работе [9] проанализированы несколько событий по данным спутников THEMIS и подтверждено, что генерация ЭМИЦ волн и высыпания энергичных протонов в сопряженных областях имеют общий источник в месте развития ионноциклотронной неустойчивости.

Количественной характеристикой взаимодействия протонов с волнами является коэффициент питч-угловой диффузии, который можно рассчитать на основании данных о спектре волн, параметрах плазмы и магнитного поля. В случаях сопряженных пролетов магнитосферных и низкоорбитальных спутников можно сопоставить полученную при расчетах резонансную энергию с энергией высыпающихся частиц [10].

В данной работе рассмотрено событие, когда регистрация ЭМИЦ волн в магнитосфере сопровождалась измерениями потоков протонов на высотах 800 км с хорошим пространственным сопряжением спутников. Особенностью события является то, что наблюдения проводились в вечернем секторе недалеко от области инжекции протонов на ночной стороне.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ СПУТНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Использовались данные магнитосферного (Van Allen Probe-B) и низкоорбитального (MetOp-2) спутников, расположенных в сопряженных областях магнитосферы и ионосферы во время регистрации данного события. Спутники Van Allen Probes (VAP-A и VAP-B, http://vanallenprobes.jhuapl.edu/) – два идентичных спутника, имевших эллиптическую орбиту с апогеем приблизительно 5.8 R_E (R_E – радиус Земли) вблизи плоскости геомагнитного экватора и период обращения 9 ч. На

этих спутниках имелся прибор EMFISIS (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science). который измерял магнитное поле в широком диапазоне частот, в частности колебания с частотами до 32 Гц [11]. Концентрация холодной плазмы оценивалась исходя из потенциала спутника (прибор EFW, Electric Field and Waves Suite) с разрешением в 1 секунду [12]. Инструмент HOPE (Helium Oxygen Proton Electron) измерял потоки электронов, протонов и ионов гелия и кислорода с энергиями от 20 эВ до 45 кэВ. Прибор **RBSPICE** (Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment) также измерял потоки заряженных частиц на разных питч-углах, но в диапазонах энергий от 20 кэВ до 1 МэВ для ионов и от 25 кэВ до 1 МэВ лля электронов.

Спутник MetOp-2 входит в состав миссии, включающей спутники NOAA/POES и MetOp, которые находятся на орбитах с высотой около 800 км (https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/). Эти спутники перекрывают широкий диапазон местного магнитного времени (MLT), обращаясь вокруг Земли примерно за 100 минут. Спутники оснащены идентичными приборами MEPED (Medium Energy Proton and Electron Detector). Прибор MEPED регистрирует потоки протонов в шести диапазонах энергий: 30-80, 80-240, 240-800, 800-2500, 2500-6900 и более 6900 кэВ. Частины дифференцируются на захваченные и высыпающиеся с помощью двух детекторов, направленных перпендикулярно друг другу. Один из них (0°), направленный в локальный зенит, на широтах выше 50° измеряет частицы в конусе потерь высыпающиеся протоны, а второй (90°) измеряет поток захваченных протонов. В диапазоне энергий до 20 кэВ измерения проводятся с помощью прибора TED (Total Energy Detector). Кроме полного потока энергии протонов в диапазоне 0.05-20 кэВ, рассчитываемого на борту, в набор параметров. перелаваемых телеметрией спутника. входят дифференциальные потоки на энергиях 189, 844, 2595, и 7980 эВ. Подробное описание приборов и их характеристик приведено в работе [13].

НАБЛЮДЕНИЯ ВО ВРЕМЯ СУББУРИ

На рис. 1 в координатах L-MLT (L — расстояние до вершины силовой трубки в радиусах Земли) показаны проекции траекторий спутников VAP-A и VAP-B в интервале 16—17 UT 1 декабря 2018 г. и проекция траектории спутника MetOp-2 в интервале 16:48—16:53 UT. Начало суббуревой активности было зарегистрировано магнитометром высокоширотной обсерватории Диксон около 16:14 UT (данные, полученные в Арктическом и Антарктическом Научно-Исследовательском Институте Росгидромета, взяты на сайте http://supermag.jhuapl.edu/). Наземная станция находилась на ночной стороне магнитосферы — около 22 ч MLT. Магнитограмма этой станции показана на рис. 2*a*.



Рис. 1. Карта траекторий спутников VAP-A, VAP-B (черным цветом) в интервале 16:00-17:00 UT и MetOp-2 (серым цветом) в интервале 16:48-16:53 UT в координатах L – MLT. Стрелки на траекториях указывают направление движения.

Изображения авроральных сияний (здесь не приводятся, см. http://ssusi.jhuapl.edu), полученные низкоорбитальным спутником DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) в два момента времени (16:25 и 16:47 UT), свидетельствуют о том, что область активных полярных сияний была протяженной по долготе и уже вскоре после начала суббури охватывала долготный сектор пролета спутника VAP-A (MLT = 21.4-22.1), на котором была зарегистрирована инжекция энергичных (десятки кэВ) протонов. Подобная инжекция, но с задержкой по времени, была зарегистрирована и на спутнике VAP-B, который в это время был в секторе 19.8–20.3 MLT вне области суббури.

НАБЛЮДЕНИЯ ВОЛН И ЧАСТИЦ В МАГНИТОСФЕРЕ

На рис. 2а серым прямоугольником отмечен временной интервал 16:18-16:50 UT, когда прибор EMFISIS на спутнике VAP-В зарегистрировал ЭМИЦ волны (рис. 26). Волны с максимальными амплитудами наблюдаются на частотах между гирочастотами гелия и кислорода, в т.н. "гелиевой" полосе. Поскольку спутник находится на довольно большом расстоянии от Земли, эта полоса находится на низких частотах ($f < 0.5 \Gamma \mu$), и ЭМИЦ волны частично зашумлены широкополосными всплесками. Одновременно с началом интенсивных ЭМИЦ волн видна инжекция (всплеск потока) протонов в диапазоне энергий 50–100 кэВ (рис. 2*в*), регистрируемая прибором RBSPICE. В популяции инжектированных частиц наблюдается отчетливая дисперсия по энергиям, т.е. со време-



Рис. 2. a - Измерения трех компонент магнитного поля Земли по данным обсерватории Диксон за период 15:00–19:00 UT (компонента Z показана пунктирной линией, компоненты E и N - серой и черной сплошными линиями соответственно). Серым прямоугольником выделен интервал времени 16:18–16:50 UT, когда спутник VAP-B регистрировал ЭМИЦ волны. На панелях $\delta - e$ показаны измерения спутника VAP-B: $\delta -$ спектрограмма поперечной компоненты магнитного поля (черная линия показывает гирочастоту ионов водорода, две белые линии – гирочастоты ионов He⁺ (выше) и O⁺ (ниже)); e, e - распределение потоков ионов (J) с питч-углом 90° по энергиям (E) в диапазонах 40–200 и 0.01–60 кэВ соответственно.

нем на спутник приходят частицы все меньших энергий. Это указывает на то, что облако инжектированных частиц появилось в окрестности спутника в результате дрейфа из ночного сектора. К 17 UT в этой популяции остались протоны с энергиями 30–50 кэВ. По данным инструмента НОРЕ наблюдаются еще две популяции протонов, которые можно интерпретировать как внешнюю часть кольцевого тока с энергиями 2–30 кэВ и внутреннюю часть плазменного слоя, образованную протонами малых (10–100 эВ) энергий. По-видимому, спутник находится на границе этих популяций. Действительно, резкое возрастание потока и энергии протонов плазменного слоя в 16:48 UT, которое соответствует смещению плазменного слоя к Земле, сопровождается исчезновением ча-



Рис. 3. *а* – Концентрация холодной плазмы (n_c); δ – зависимость от времени энергетического спектра коэффициента питч-угловой диффузии протонов; e – параметр *z*, пунктиром показан уровень со значением 1.

стиц внешнего кольцевого тока (рис. 2г). При этом частицы с энергиями 30–50 кэВ на смещение плазменного слоя практически не реагируют. Это, по-видимому, означает, что инжекция охватывает не только внешнюю часть кольцевого тока, но и внутреннюю часть плазменного слоя.

Из рис. За видно, что в период регистрации ЭМИЦ волн спутник находился в области довольно плотной холодной плазмы, т.е. в плазмосфере, а около 16:48 UT пересек плазмопаузу. В это же время прекратилась и регистрация ЭМИЦ волн на спутнике. Это говорит о том, что область генерации ограничена плазмосферой, но не простирается в плазменный слой.

Энергетические спектры протонов, представленные на рис. 2*в* и 2*г*, определены для протонов с питч-углом 90°. Появление на спутнике частиц с меньшими питч-углами (данные не показаны) запаздывает относительно времени появления 90-градусных протонов, что подтверждает дрейф облака протонов из ночного сектора. Распределение инжектированных протонов по питч-углам во время наблюдения ЭМИЦ волн имеет выраженный максимум на углах, близких к 90°.

КОЭФФИЦИЕНТ ПИТЧ-УГЛОВОЙ ДИФФУЗИИ ДЛЯ ЭМИЦ ВОЛН

Одним из следствий резонансного взаимодействия протонов дрейфующего потока с ЭМИЦ волнами является рассеяние частиц в конус потерь, описываемое квазилинейной теорией [например, 14]. Количественную оценку этому рассеянию можно дать, рассчитав коэффициент питч-угловой диффузии (*D*αα). В работе [15] подобный расчет проведен для событий, наблюдаемых по данным спутников THEMIS. В этой же работе приводится методика расчета.

На рис. Зб показан результат расчета коэффициента питч-угловой диффузии для рассматриваемого события. По данным VAP-В были определены спектральная плотность мощности ЭМИЦ волн, величина магнитного поля, ионный состав и концентрация холодной плазмы (рис. 3а), необходимые для вычислений. Ионный состав определен по данным НОРЕ, т.е. для частиц с энергиями выше 30 эВ, и результат распространен на холодную плазму. Из представленного результата видно, что энергии, которые соответствуют максимальным значениям *D*αα, не остаются постоянными на протяжении времени регистрации волн. В начале события в 16:18-16:21 UT интенсивный всплеск, на частоте чуть ниже гирочастоты He+ (см. спектрограмму на рис. 26) вызывает наибольшее рассеяние частиц с резонансными энергиями порядка нескольких кэВ. Начиная с 16:23 UT, генерируемым ЭМИЦ волнам соответствуют энергии 3-20 кэВ, а к концу интервала наблюдения волн они составляют 3-40 кэВ.

В результате рассеяния в конус потерь в магнитосфере в магнитосопряженных областях ионосферы северного и южного полушарий Земли мы можем ожидать увеличение потоков высыпающихся протонов в этих же диапазонах энергий.



Рис. 4. a – Профиль интенсивности потока захваченных (серая линия) и высыпающихся (черная линия) протонов для прибора MEPED в канале P1 (энергии 30–80 кэВ), измеренные на спутнике MetOp-2 во время пролета, показанного на рис. 1; δ – спектр потока протонов в момент времени 16:51 UT по данным приборов MEPED и TED спутника MetOp-2.

НАБЛЮДЕНИЯ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ В ИОНОСФЕРЕ

На рис. 4а показаны наблюдения потоков протонов на борту спутника MetOp-2. Известно, что высыпания, связанные с ЭМИЦ волнами, наблюдаются к экватору от границы изотропии потоков, т.е. границы, отделяющей область изотропных потоков на более высоких широтах от области на низких широтах, где преобладают захваченные частицы [16]. В данном случае эту границу определить непросто, поскольку, как часто бывает в вечернем-ночном секторе [9], высыпания в анизотропной зоне примыкают к границе изотропии. Тем не менее, по характеру вариаций потоков захваченных и высыпающихся частиц можно предположить, что она находится не ниже, чем L = 6. Это согласуется с тем, что в районе спутника VAP-B, находившегося в это время примерно на L = 6, питч-угловые распределения энергичных протонов в это время были в основном анизотропны. На меньших L-оболочках потоки имеют характерный для анизотропной зоны вид всплесков, особенно для высыпающихся частиц. Область высыпаний, связанных с ЭМИЦ волнами, простирается от границы изотропии вглубь магнитосферы до $L \approx 4.5$ (рис. 4*a*).

По измерениям дифференциального потока протонов в трех первых каналах прибора MEPED (в остальных каналах высыпания были пренебрежимо малы) и четырех каналах прибора TED были построены энергетические спектры протонов в области высыпаний, связанных с ЭМИЦ волнами. Пример такого спектра для момента 16:51 UT показан на рис. 46. Видно, что в спектре присутствует пик на энергии около 10 кэВ. Положение этого пика согласуется с областью резонансных энергий, соответствующих максимуму рассчитанного по данным VAP-В коэффициента питч-угловой диффузии. Подобный вид спектра с некоторыми вариациями высоты пика и ширины спектра наблюдался в течение всего пролета MetOp-2 в области высыпаний в анизотропной зоне.

ОБСУЖДЕНИЕ

Качественное сопоставление наблюдений ЭМИЦ волн в приэкваториальной магнитосфере с измерениями потоков частиц на низкоорбитальных спутниках проводилось в работе [9], где было показано, что на малых высотах в области, сопряженной с генерацией волн, наблюдаются высыпания энергичных протонов. Здесь мы подтвердили это на примере наблюдений ЭМИЦ волн на спутнике VAP-В и высыпаний частиц на низкоорбитальном спутнике MetOp-2 и показали, что рассчитанный диапазон резонансных энергий протонов согласуется с энергетическим спектром высыпающихся протонов.

Максимальные значения коэффициента диффузии на протяжении 16:18-16:50 UT лежат в диапазоне 0.006-0.451 с⁻¹, т.е. характерное время диффузии составляет от 2 до 166 секунд. Такой широкий диапазон значений обусловливает наличие двух режимов диффузии: сильной, когда конус потерь непрерывно заполняется и распределение потоков приближается к изотропному, и слабой, когда конус потерь опустошается быстрее, чем частицы успевают наполнить его вследствие питч-угловой диффузии. Можно ввести параметр z, который меньше 1 для сильной диффузии и больше 1 для слабой [1, 4, 10, 14]. Здесь формула для вычисления z не приводится для краткости. Результат расчета *z* показан на рис. 3*в*, где видно чередование режимов диффузии. Потоки захваченных и высыпающихся протонов во всплесках экваториальнее границы изотропии на рис. 4а практически равны, что полтверждает режим сильной диффузии в области источника волн.

Генерация волн в магнитосфере совпала с появлением на спутнике VAP-В повышенного потока энергичных протонов с энергиями >40 кэВ (рис. 2). Дисперсия частиц по энергиям и питчуглам указывает на то, что они дрейфовали из области развития суббури в ночном секторе. Области инжекции и генерации волн, по-видимому, занимали довольно широкий диапазон L-оболочек. Судя по высыпаниям протонов, экваториальная граница этого диапазона находится на L = 4.5 (рис. 4), а приполюсная граница — около L = 6. Здесь же находилась плазмопауза (рис. 2). Таким образом, генерация волн произошла внутри плазмопаузы, в области, где резко возрос поток горячих протонов с поперечной анизотропией. т.е., где выполнены vсловия генерации ЭМИЦ волн [4]. Окончание регистрации ЭМИЦ волн при выходе спутника за пределы плазмосферы согласуется с представлением о том, что наличие достаточно плотной холодной плазмы или градиента плотности играет важную роль в генерации ЭМИЦ волн и их дальнейшем эффективном взаимодействии с заряженными частицами [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный случай является примером взаимосвязи ЭМИЦ-волн и протонных высыпаний. На основании данных о параметрах плазмы, магнитного поля и частотного спектра волн получены резонансные энергии частиц, рассеиваемых ЭМИЦ волнами в конус потерь, и коэффициент питч-угловой диффузии вблизи конуса потерь. Во время сопряженного пролета низкоорбитального спутника зарегистрированы высыпания экваториальнее "изотропной границы" на энергиях, соответствующих диапазону максимумов коэффициента питч-угловой диффузии. Равенство потоков захваченных и высыпающихся частиц согласуется с достаточно большой величиной рассчитанного коэффициента диффузии.

Авторы благодарят создателей спутников Van Allen Probes и разработчиков инструментов за возможность свободного использования данных (EMFISIS – Крэйг Клетцинг, EFW – Джон Вайгант, HOPE – Джефф Ривс, RBSPICE – Луис Ланцеротти), NOAA за свободный доступ к данным спутников POES на сайте (https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/), лабораторию прикладной физики университета Джона Хопкинса за предоставление данных со спутника DMSP (http://ssusi.jhuapl.edu) и данных наземных магнитометров на сайте http://supermag.jhuapl.edu.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ПГИ (№ АААА-А18-118012490100-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Bespalov P.A., Trakhtengerts V.Yu. // Rev. Plasma Phys. 1986. V. 10. P. 155.
- 2. Bespalov P.A., Demekhov A.G., Grafe A., Trakhtengerts V.Yu. // Ann. Geophys. 1994. V. 12. P. 422.
- 3. *Wang X.Y., Huang S.Y., Allen R.C. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. Art. No. 8228.
- Kennel C.F., Petschek H.E. // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. No. 1. P. 1.
- Cornwall J.M., Coroniti F.V., Thorne R. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4699.
- 6. Яхнин А.Г., Титова Е.Е., Демехов А.Г. и др. // Геомаг. и аэроном. 2019. Т. 59. № 6. С. 714; Yahnin A.G., Titova E.E., Demekhov A.G. et al. // Geomag Aeron. 2019. V. 59. No. 6. Р. 668.
- Zhang Y., Shi R., Ni B. et al. // Adv. Space Res. 2017. V. 59. P. 1568.
- Summers D., Shi R., Engebretson M.J. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. Art. No. 10129.
- Попова Т.А., Яхнин А.Г., Демехов А.Г., Черняева С.А. // Геомаг. и аэроном. 2018. Т. 58. № 4. С. 484; Ророva Т.А., Yahnin A.G., Demekhov A.G., Chernyaeva S.A. // Geomag. Aeron. 2018. V. 58. No. 4. Р. 469.
- Popova T., Lyubchich A., Demekhov A., Yahnin A. Problems of Geocosmos–2018. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2020. P. 309.
- Kletzing C., Kurth W., Acuna M. et al. // Space Sci. Rev. 2013. V. 179. No. 1–4. P. 127.
- Wygant J., Bonnell J., Goetz K. et al. // Space Sci. Rev. 2013. V. 179. No. 1–4. P. 183.
- 13. Evans D.S., Greer M.S. NOAA Tech. Memo version 1.4. 2004.
- Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М. Дж. Свистовые и альфвеновские циклотронные мазеры в космосе. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 344 с.
- Попова Т.А., Любчич А.А., Демехов А.Г., Яхнин А.Г. // Тр. Кольск. науч. центра РАН. Гелиогеофизика. 2018. Т. 5. № 9. С. 45.
- Yahnin A.G., Yahnina T.A. // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 1690.
- Yahnin A.G., Yahnina T.A., Frey H., Pierrard V. // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2013. V. 99. P. 61.

Proton precipitations and EMIC waves related to the substorm injection

T. A. Popova^{a, *}, A. G. Demekhov^a, A. G. Yahnin^a

^aPolar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia *e-mail: tarkada@vandex.ru

By using a case study, we analyze the relationship between the parameters of electromagnetic ion cyclotron waves in the Earth's magnetosphere and the parameters of trapped and precipitated ring current ions. We demonstrate an agreement of the observed energies and the isotropy of precipitated protons at low altitudes to the results of calculations of the pitch-angle diffusion coefficient.