УДК 550.538.8, 550.385.37

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОТОННЫХ СИЯНИЙ В СУБАВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ С ГЕОМАГНИТНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ В ДИАПАЗОНЕ Pc1 (ОБЗОР)

Т.А. Яхнина, А.Г. Яхнин
Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

В обзоре представлены результаты изучения взаимосвязи различных форм протонных сияний в субавроральной зоне с геомагнитными пульсациями диапазона Pc1 (0.2-5.0 Гц), которые являются индикатором электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн. Показано, что каждому типу протонных сияний, обнаруженных по наблюдениям со спутника IMAGE, соответствует определенный тип геомагнитных пульсаций. Сделан вывод о том, что протонные сияния являются проекциями на ионосферу магнитосферных областей, в которых развивается ионно-циклотронная неустойчивость.

Ключевые слова:
геомагнитные пульсации, протонные сияния, ионно-циклотронная неустойчивость.




Введение

В достаточно удаленной от Земли области, где кривизна магнитного поля в экваториальной плоскости сопоставима с ларморовским радиусом вращения энергичных протонов, протоны испытывают рассеяние, и их распределение по питч-углам является изотропным. Это приводит к стабильно существующей зоне высыпаний энергичных протонов на широтах близких к широтам авроральной зоны. Ближе к Земле движение энергичных протонов является адиабатическим. Как следствие, в субавроральной зоне конус потерь не заполнен, и распределение потоков протонов анизотропно. Такое распределение частиц во внутренней магнитосфере может привести к развитию неустойчивости при взаимодействии циклотронных волн с протонами кольцевого тока и плазменного слоя. Это предполагает как генерацию электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн на частотах ниже гирочастоты протонов (а в присутствии холодной плазмосферной плазмы – ниже гирочастоты ионов гелия He+), так и рассеяние протонов в конус потерь и, соответственно, их высыпание в атмосферу. Действительно, в работе [1] (см. также ссылки в этой работе) по данным измерений потоков частиц на низкоорбитальных спутниках NOAA внутри анизотропной зоны были выделены характерные типы локализованных протонных высыпаний, статистически коррелирующие с геомагнитными пульсациями диапазона Pc1. Пульсации диапазона Pc1, как известно, являются индикатором ЭМИЦ волн, дошедших из магнитосферы до ионосферы.

Наблюдения на низкоорбитальных спутниках не позволяют получить мгновенную пространственную картину протонных высыпаний и ее временную эволюцию. Такую возможность могут предоставить наблюдения протонных сияний (свечения, вызванного высыпающимися магнитосферными протонами в процессе перезарядки и образования возбужденных атомов водорода). Результаты наблюдений со спутника IMAGE показали, что существует несколько типов протонных сияний в субавроральной области [2]. Протонные сияния в виде пятен свечения регистрируются, в основном, в утреннем и дневном секторах MLT [3]; сияния в виде дуги к экватору от протонного овала, наблюдаются на вечерней стороне [4, 5]; вспышки протонных сияний отмечаются в дневном секторе [6, 7]. Эти протонные сияния отличаются формой, размерами и геофизическими условиями, в которых они наблюдаются [2]. Данные низкоорбитальных спутников FAST, DMSP и NOAA подтвердили, что сияния вызваны высыпанием энергичных протонов. Оценка энергии частиц составила >10 кэВ, >20 кэВ, >30 кэВ для вспышек, дуг и пятен, соответственно.

В частотном диапазоне Pc1 существует несколько типов пульсаций, отличающихся своими морфологическими характеристиками [8]. Морфология квазимонохроматических пульсаций Pc1 (далее для краткости мы будем называть их как «пульсации Pc1») подобна морфологии субавроральных протонных пятен. И те, и другие наблюдаются, в основном, во время восстановительной фазы магнитной бури в утреннем и дневном секторах MLT. Колебания убывающего периода (далее пульсации IPDP – intervals of pulsations of diminishing periods) как и протонные дуги регистрируются в вечернем секторе во время магнитных возмущений.

Широкополосные «всплески гидромагнитных эмиссий» [8] (далее - всплески пульсаций Pc1) как и вспышки протонного сияния возникают на дневной стороне во время поджатия магнитосферы, вызванного импульсами динамического давления солнечного ветра. Однако это сходство морфологических признаков может быть случайным, и для установления взаимосвязи сияний и пульсаций требуется детальное исследование. В данном обзоре будут кратко представлены результаты анализа одновременных наблюдений протонных сияний на спутнике IMAGE и геомагнитных пульсаций в обс. Ловозеро и на станциях финской меридиональной цепочки, проведенного в работах [9-14].

Данные

Наблюдения протонных сияний на высоко-апогейном (~9 R_E) спутнике IMAGE обеспечивались детектором SI12 прибора FUV (Far UltraViolet imager) [15], который получал глобальные изображения свечения в водородной эмиссии Лайман-α (121.8 нм) каждые 2 минуты. Геомагнитные пульсации регистрировались в диапазоне 0.05 – 4 Гц в обс. Ловозеро (64.2º CGLat, MLT= UT+3) и на станциях финской меридиональной цепочки (57.0º - 65.9º CGLat, MLT= UT+2). Регистрация осуществлялась индукционными магнитометрами с частотой сбора данных 40 Гц. Магнитометры финской сети идентичны и одинаково откалиброваны, что позволяет определять распределение интенсивности пульсаций вдоль меридиана. Потоки высыпающихся и квазизахваченных (с питч-углами 0º и 90º, соответственно) протонов с энергией E>30 кэВ измерялись на низкоорбитальных (800 км) спутниках NOAA POES [16].

Результаты наблюдений

Взаимосвязь пятен протонного свечения и пульсаций Pc1

Пятна протонных сияний с размерами 2º -3º по широте и ~1 часа по MLT наблюдаются на широтах 56º -68º исправленной геомагнитной широты (CGLat) [3]. Время жизни пятен свечения достигает нескольких часов; все это время они остаются примерно на одной широте, но смещаются по MLT со скоростью близкой к скорости вращения Земли. На рис. 1 показан пример наблюдения пятна протонных сияний.

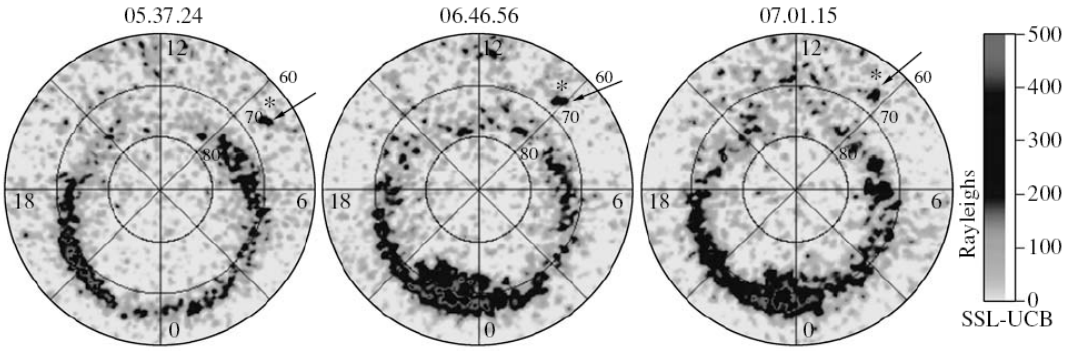


Рис. 1. Изображения протонных сияний по данным спутника IMAGE для трех моментов времени 28.02.2001. Субавроральное протонное пятно отмечено стрелкой около 09 MLT на широте 65°-67°. Положение обс. Ловозеро отмечено звездочкой

Сопоставление протонных пятен с наблюдениями геомагнитных пульсаций на земной поверхности показало [10], что на станциях, отстоящих от проекции пятна на расстояниях менее двух часов MLT, пульсации начинаются и заканчиваются практически одновременно с появлением и исчезновением пятна (рис. 2). С удалением обсерватории от проекции пятна корреляция между пятном сияний и Pc1 ухудшается, а на расстояниях более 6 часов MLT корреляция отсутствует [11]. Частота пульсаций обратно пропорциональна широте соответствующего им протонного пятна и ниже экваториальной гирочастоты He+ на этой широте. Рассмотрение широтного распределения интенсивности Pc1 на меридиональной сети станций показало, что максимальная интенсивность пульсаций наблюдается на той станции меридиональной цепочки, широта которой ближе всего к проекции пятна. В случае наблюдения сразу двух пятен на разных широтах, на земной поверхности регистрируются пульсации Pc1 в виде двух полос в спектре, причем, времена наблюдения «низкочастотной» («высокочастотной») полосы и высокоширотного (низкоширотного) пятна

совпадают. Спутники NOAA регистрируют над пятнами сияний локализованные высыпания протонов с энергией E > 30 кэВ, которые, как было показано в работах [1, 9], статистически связаны с пульсациями Pc1.

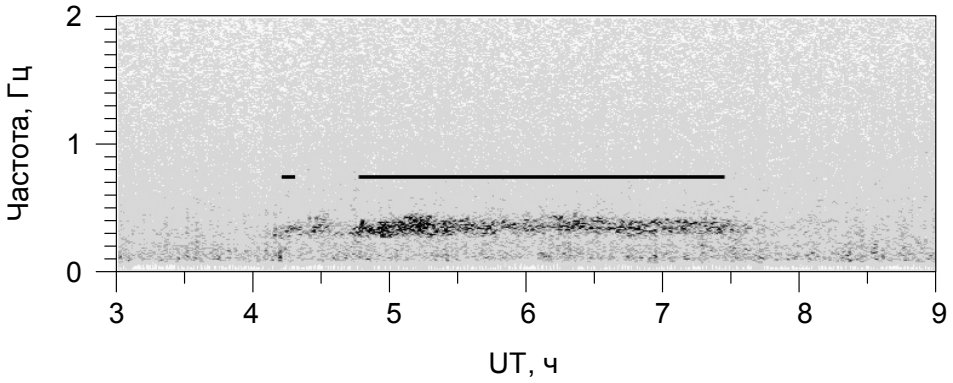


Рис. 2. Спектрограмма флуктуаций геомагнитного поля в обс. Ловозеро в диапазоне 0.05-2 Гц в интервале 03-09 UT 28.02.2001. Горизонтальная линия показывает интервал наблюдения субаврорального протонного пятна

Протонные дуги и IPDP

Протонные сияния в форме дуги вытянутой вдоль протонного аврорального овала наблюдаются на широтах 60º -70º CGLat. Дуги имеют размеры 1º-5º по широте и несколько часов по MLT; время их наблюдения не превышает двух часов [4, 5]. Протонные дуги наблюдаются, в основном, в вечернем секторе MLT после суббуревой инжекции энергичных протонов в ночном секторе.

Сопоставление этого типа сияний с геомагнитными пульсациями, как для отдельных событий, так и статистически было проведено в работе [13]. Были проанализированы данные о пульсациях IPDP за 2004 и 2005 гг. (всего 153 события), что позволило выявить некоторые морфологические характеристики этих пульсаций. В частности, когда IPDP наблюдались только на одной из станций (что предполагает проекцию источника пульсаций вблизи этой станции), конечная частота IPDP была всегда меньше экваториальной гирочастоты He+, рассчитанной для широты этой станции.

Для 35 событий IPDP имелись наблюдения протонных сияний со спутника IMAGE. Пример одновременных наблюдений протонных сияний и IPDP для 29 октября 2004 г. показан на рис. 3. Серия IPDP наблюдалась между 1750 и 1930 UT. В интервале ~1800-1830 UT конечная частота пульсаций достигла 0.7 Гц. Снимок протонных сияний, фрагмент которого показан на рисунке, получен в ~1816 UT (этот момент отмечен на спектрограмме вертикальной линией). Видна протонная дуга, пересекающая меридиан цепочки наземных станций (~20.3 MLT). Дуга наблюдалась в 1755-1836 UT и занимала сектор 18-22 MLT. Положение дуги подтверждают наблюдения высыпающихся частиц на спутниках NOAA 15 и 17 (данные не показаны). Эти спутники пересекали дугу в вечернем секторе на ~18.4 и ~21.9 MLT, соответственно, в 1819 и 1835 UT. И хотя в этих секторах дуга была едва различима (из-за близости к протонному овалу на 18 MLT и из-за слабой интенсивности дуги на ~22 MLT), оба спутника регистрировали локализованные высыпания энергичных протонов (отмечены треугольниками) к экватору от протонного овала. В нижней части рис. 3 показаны положения наземных станций и протонной дуги в прямоугольных координатах, какими они были в 1816 UT. Станция OUL, на которой регистрировались самые интенсивные пульсации, находится ближе всего к дуге. Чем дальше по широте находится станция от протонной дуги, тем менее интенсивные IPDP на ней регистрируются.

Во всех случаях одновременных наблюдений пульсаций IPDP и протонных сияний, к экватору от овала на меридиане наземной сети магнитометров появлялась протонная дуга. Интервалы наблюдения дуг соответствовали интервалам регистрации IPDP. С ростом MLT протонные дуги наблюдались, в среднем, на меньших широтах. Это согласуется с зависимостью широты наблюдения IPDP от MLT и с тем, что конечная частота IPDP растет с увеличением MLT.

Сопоставление с данными геостационарного спутника, расположенного вблизи меридиана наблюдений пульсаций, показало, что события IPDP коррелируют с инжекциями энергичных протонов. Низкоорбитальные спутники NOAA регистрируют над дугой протонных сияний особый тип локализованных протонных высыпаний, связанный с пульсациями IPDP [1, 9].

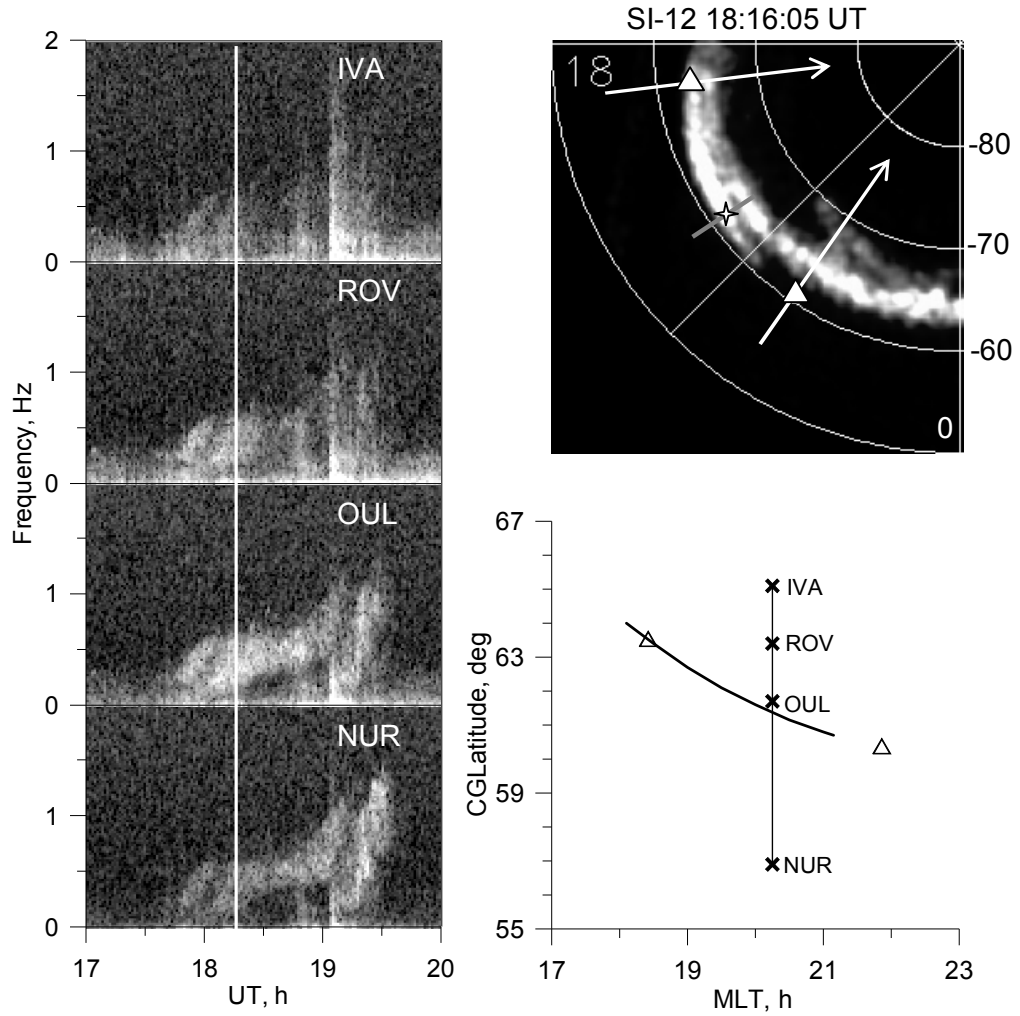


Рис. 3. Спектры пульсаций, зарегистрированные на четырех станциях финской меридиональной сети для 17-20 UT 29.10.2004 (слева); фрагмент изображения протонных сияний в 1816 UT по данным спутника IMAGE (вверху, справа). На снимке сияний белыми стрелками показаны орбиты двух спутников NOAA. Треугольниками отмечены положения ЛВЭП. Отрезком и звездочкой показаны меридиональная сеть магнитометров и станция OUL, соответственно. Внизу справа протонная дуга и наземные станции представлены в прямоугольных координатах

Вспышки протонных сияний и связанные с ними пульсации в диапазоне Pc1

Вспышки протонных сияний наблюдаются на дневной стороне на широтах 60º-70º CGLat, имеют размеры 2º-5º по широте и до 3-5 часов по MLT. Длительность отдельной вспышки составляет несколько минут. Такие вспышки протонных сияний связаны с резкими усилениями динамического давления солнечного ветра [6, 7].

Во время магнитосферных «поджатий», связанных с увеличением динамического давления солнечного ветра, на дневной стороне субавроральной зоны могут наблюдаться следующие типы отклика в пульсациях диапазона Pc1: 1) широкополосные всплески Pc1 и 2) «монохроматические» Pc1, появляющиеся (или усиливающиеся) после скачка давления [например, 17-21].

Широкополосные всплески Pc1 наблюдаются на частотах от десятых долей герца до 1-2 Гц. Наблюдения соответствующих ЭМИЦ волн на спутниках показали, что частоты этих излучений всегда ниже гирочастоты протонов. Длительность отдельного всплеска составляет несколько минут, период следования 10-20 мин, [например, 8, 22]. В качестве примера широкополосных всплесков на рис. 4 приводится событие 31 мая 2005 г., рассмотренное в работе [12]. Это событие отличалось тем, что в течение длительного времени наблюдалось большое количество вспышек протонного свечения и всплесков Pc1. Спутник Geotail, который находился в переходной области и перемещался из дневного в вечерний сектор MLT, зарегистрировал серию импульсов динамического давления. Наземные среднеширотные станции в широком долготном секторе (~8 часов MLT, от Львова на

западе до японской станции Мемамбетсу на востоке) зафиксировали серию синхронных импульсов в X-компоненте магнитного поля, что также свидетельствует о серии «поджатий» магнитосферы.

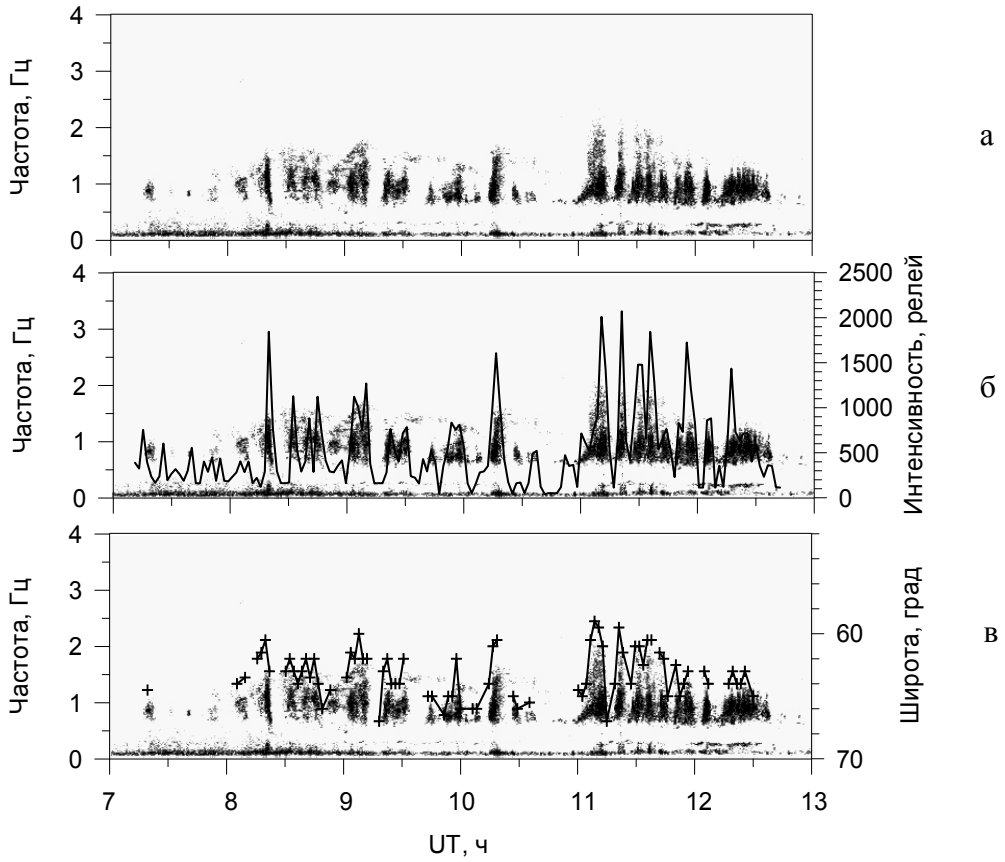


Рис. 4. а – спектрограмма флуктуаций геомагнитного поля в обс. Ловозеро в диапазоне 0.1-4 Гц в интервале 07-13 UT 31.05.2005, показывающая последовательность всплесков пульсаций в диапазоне Pc1; б – та же спектрограмма в сочетании с вариациями интенсивности протонных сияний (черная линия); в – та же спектрограмма в сочетании с вариациями экваториальной широты протонных сияний на меридиане обс. Ловозеро (черная линия с крестиками)

Сопоставление вспышек сияний и всплесков пульсаций показало их хорошую временную корреляцию. На рис. 4а показана спектрограмма пульсаций в обс. Ловозеро. Черной линией на рис. 4б показаны вариации интенсивности протонных сияний в области, сопряженной с обс. Ловозеро. Усиления интенсивности сияний соответствуют всплескам в пульсациях. Верхняя частота пульсаций заметно меняется. Ее значения антикоррелируют с широтой экваториальной границы протонных вспышек на меридиане обс. Ловозеро (рис. 4в). Чем ниже широта экваториальной границы протонной вспышки, тем выше частота соответствующего ей всплеска.

Согласно данным магнитометров финской меридиональной сети станций, наблюдаемые изменения частоты во время отдельного всплеска пульсаций связаны с изменением широты соответствующей вспышки протонного сияния. Смещение вспышки к полюсу (к экватору) сопровождается появлением всплеска излучения с уменьшающейся (нарастающей) частотой и усилением интенсивности пульсаций на более высокоширотных (низкоширотных) станциях [12].

Пример появления «монохроматических» Pc1 в качестве отклика в пульсациях на скачок давления солнечного ветра показан на рис. 5. Это событие, наблюдавшееся 17 августа 2001 г., было рассмотрено в работе [14]. Сверху вниз показаны: спектрограмма геомагнитных пульсаций для интервала 10-12 UT; динамическое давление солнечного ветра (ΔP = 6 нПа); геомагнитный индекс SYM-H. Резкое увеличение SYM-H на 40 нТл подтверждает резкое сжатие магнитосферы. Станция Ловозеро, измерявшая геомагнитные пульсации, находилась в долготном секторе вспышки протонных сияний.

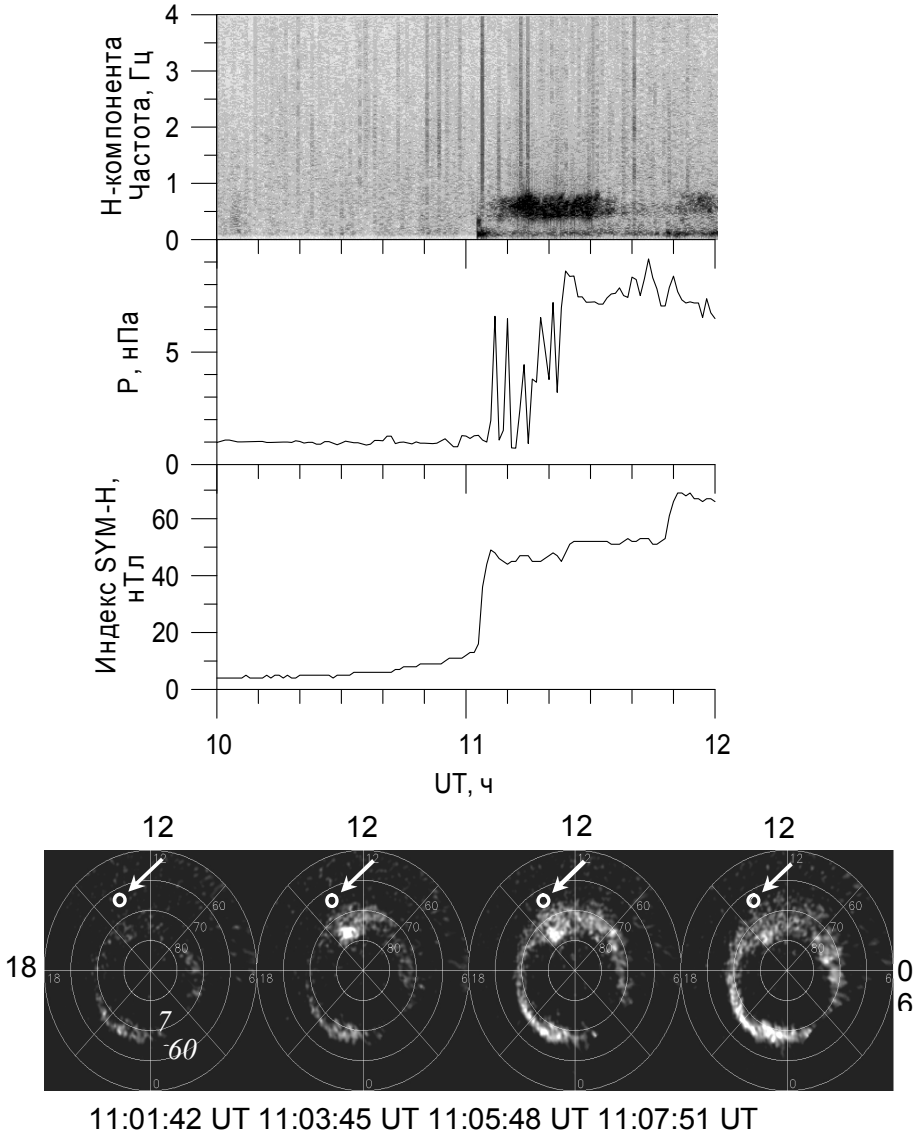


Рис. 5. Явления, сопровождающие скачок давления солнечного ветра 17.08.2001. Сверху вниз: спектрограмма вариаций геомагнитного поля в диапазоне 0.05 -4 Гц в обс. Ловозеро; динамическое давление солнечного ветра; геомагнитный индекс SYM-H; последовательность изображений протонных сияний со спутника IMAGE

В работе [14] было проведено статистическое изучение взаимосвязи между скачками динамического давления солнечного ветра, вспышками протонного свечения, пульсациями диапазона Pc1 и вариациями геомагнитного индекса SYM-H. Для этого были использованы одноминутные значения динамического давления солнечного ветра и SYM-H из базы данных OMNI за 2001-2005 гг. (http://omniweb.gsfc.nasa.gov), данные прибора SI12 на спутнике IMAGE и наблюдения пульсаций в обс. Ловозеро. Отбирались случаи достаточно больших, резких (не менее 1 нПа в течение 1 мин) и изолированных скачков динамического давления (всего отобрано 62 случая). Показано, что во время скачков давления солнечного ветра в 70% случаев наблюдались вспышки протонного свечения к экватору от овала сияний. При этом во время скачков давления, которые были связаны с межпланетными ударными волнами (МУВ), вспышки протонных сияний наблюдались в 85% случаев. Увеличения давления во время тангенциальных разрывов (ТР) сопровождались вспышками протонных сияний только в 45% случаев. Когда наземная станция была сопряжена с областью, занимаемой вспышкой протонных сияний, появление или интенсификация уже существующих пульсаций в диапазоне Pc1 наблюдались в 96% случаев. Когда наземная станция не была сопряжена с областью вспышки протонного свечения, отклик в геомагнитных пульсациях наблюдался в 32% событий. В случаях, когда скачок давления солнечного ветра не сопровождался вспышкой протонного свечения, отклик в пульсациях диапазона Pc1 не наблюдался. Таким образом, наличие отклика в пульсациях диапазона Pc1 зависит от того, сопровождается ли скачок давления вспышкой протонных сияний, и от того, была ли наземная станция, регистрирующая пульсации, сопряжена с областью, занятой вспышкой.

Средние значения Δ(SYM-H) для событий, относящихся к МУВ и ТР, составляют 31.1 и 14.9 нТл, соответственно, т.е. во время МУВ происходит более сильное сжатие магнитосферы. Величина скачка давления в событиях с МУВ, в среднем, также выше (7.6 нПа) по сравнению с ТР (3.7 нПа). Средние значения Δ(SYM-H) для скачков давления со вспышками протонных сияний и без них составили 30.7 и 11.8 нТл, соответственно. На рис. 6 приведены распределения Δ(SYM-H) для различных типов отклика в геомагнитных пульсациях диапазона Pc1. Очевидно, что всплески Pc1 происходят при заметно больших сжатиях магнитосферы (среднее значение Δ(SYM-H) = 42.6 нТл), чем начала или интенсификации «монохроматических» Pc1 (среднее Δ(SYM-H) = 24.1 нТл). Отсутствие отклика в пульсациях соответствует наименьшему сжатию магнитосферы (среднее Δ(SYM-H) = 17.6 нТл).

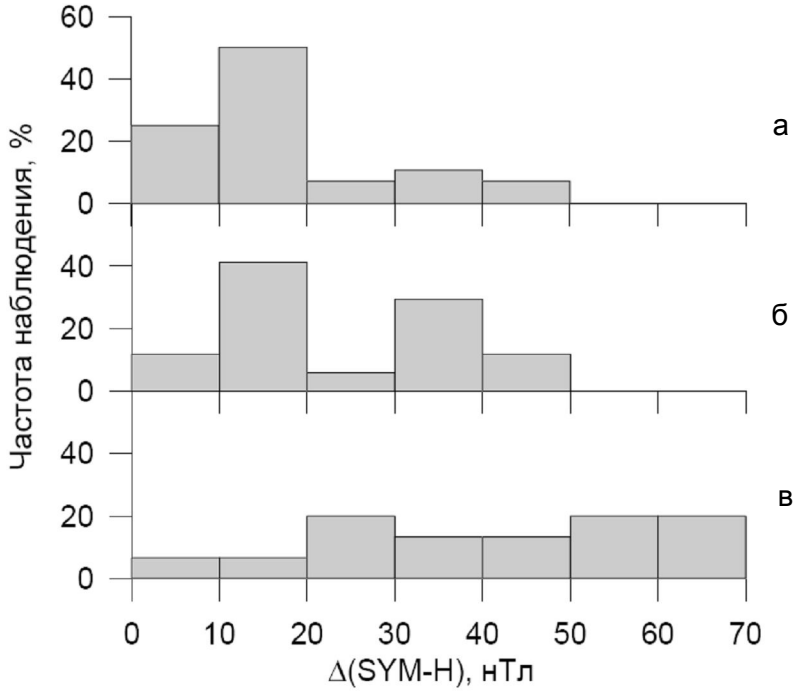


Рис. 6. Распределение частоты наблюдения событий по величине Δ(SYM-H) в ситуациях, когда отклик в пульсациях диапазона Pc1 отсутствовал (а); когда наблюдалось начало или усиление «монохроматических» Pc1 (б); и когда наблюдался всплеск Pc1 (в)

Обсуждение

Тесная пространственно-временная взаимосвязь протонных сияний и геомагнитных пульсаций диапазона Pc1 означает их общий источник, которым, очевидно, является ионно-циклотронная неустойчивость. Поскольку высыпания частиц происходят вдоль силовых линий, протонные сияния являются ионосферной проекцией области развития этой неустойчивости в магнитосфере. Известно, что благоприятным условием для генерации электромагнитных циклотронных волн является наличие градиентов холодной плазмы. Пока немногочисленные сопоставления протонных сияний с положением границ плазмосферы подтверждают это.

Так, проведенное в работе [3] сопоставление экваториальной проекции пятна с положением плазмопаузы, которая была определена по данным прибора EUV (Extreme UltraViolet imager), также установленном на борту IMAGE, показало, что пятно проектируется в окрестность азимутальной неоднородности холодной плазмы в районе плазмопаузы.

Протонные дуги в вечернем секторе проектируются на край структуры холодной плазмосферной плазмы, которая в современной литературе получила название «плазмосферный плюм» [23]. Плюм представляет собой продолжение вечернего плазмосферного выступа на высокие широты дневного сектора. С помощью измерений плазмы и горячих частиц в районе плазмосферного плюма на геостационарной орбите авторы работы [24] рассчитали инкремент генерации протонных циклотронных волн и пришли к выводу, что, действительно, условия для развития неустойчивости, т.е. для рассеяния протонов в конус потерь и, соответственно, формирования протонной дуги, были благоприятными.

Плазмопауза, вблизи которой располагается источник пульсаций Pc1 и протонных пятен, обычно находится внутри геостационарной орбиты, в то время как плазмосферный плюм (область источника протонных дуг и IPDP) может простираться за геостационарную орбиту. Это согласуется с данными, полученными в работе [1], где показано, что во время регистрации пульсаций Pc1 и IPDP плотность холодной плазмы на геостационарной орбите отличается на порядок и составляет, соответственно, единицы $см^{-3}$ и десятки $см^{-3}$.

Вспышки протонных сияний на дневной стороне субавроральной зоны, по-видимому, не связаны непосредственно с плазмосферой и могут наблюдаться за плазмопаузой [7]. Превышение порога циклотронной неустойчивости определяется, очевидно, увеличением анизотропии горячих протонов в областях магнитосферы, подвергшихся сжатию в результате резкого изменения динамического давления солнечного ветра [25]. Авторы работы [7] по данным геосинхронных спутников анализировали параметры плазмы и горячих частиц в области, куда проектируются протонные сияния во время вспышек и сделали вывод, что изменение этих параметров во время поджатия магнитосферы, действительно, должно привести к увеличению инкремента циклотронной неустойчивости.

Субавроральные протонные сияния делают «видимой» ионосферную проекцию магнитосферного домена, в котором развивается ионно-циклотронное взаимодействие. Визуализация источника и проектирование его в магнитосферу позволяет объяснить некоторые свойства геомагнитных пульсаций. Например, тесная связь квазимонохроматических Pc1 с протонными пятнами означает, что источник этих эмиссий довольно локализован, имеет размеры порядка ~1 R_E, что определяет небольшую ширину спектра Pc1. Движение со скоростью коротации азимутальной неоднородности холодной плазмы вокруг Земли вдоль одной и той же L-оболочки и существенное время жизни источника (как следует из динамики протонного пятна в ионосфере) объясняет стабильность частоты Pc1 и продолжительность этих пульсаций, наблюдаемых на сопряженных наземных станциях [10]. Вспышка протонного сияния на дневной стороне во время большого скачка давления солнечного ветра может занимать большой диапазон широт, что соответствует широкому диапазону гирочастот в области магнитосферного источника. Это, очевидно, определяет широкополосный характер всплесков Pc1. Динамика вспышек протонного сияния в ионосфере объясняет вариации верхней частоты в последовательности всплесков Pc1 и дисперсию частоты в отдельных всплесках [12]. Появление «монохроматических» пульсаций Pc1 во время относительно слабых сжатий магнитосферы связано с более локализованными по широте вспышками, которые, вероятно, проектируются на плазмопаузу. По-видимому, в тех случаях, когда увеличение анизотропии горячих протонов не приводит к превышению порога неустойчивости вне плазмосферы, наличие градиента холодной плазмы является дополнительным фактором, способствующим генерации ЭМИЦ волн.

Проектирование протонных сияний в экваториальную плоскость магнитосферы показывает, что различные типы пульсаций (очевидно, соответствующие различным режимам циклотронного взаимодействия) генерируются в различных магнитосферных доменах. Пятна и дуги проектируются в окрестность плазмопаузы, где в составе холодной плазмы существенна доля ионов He+. Это объясняет, почему пульсации Pc1 и IPDP наблюдаются на частотах ниже гирочастоты He+. Мощные вспышки проектируются за плазмосферу, где доля ионов He+ незначительна. Как следствие всплески Pc1 наблюдаются на частотах выше He+ и ниже гирочастоты протонов [например, 26].

Выводы

В результате сопоставления субавроральных протонных сияний, обусловленных высыпаниями энергичных (E>10 кэВ) протонов, и геомагнитных пульсаций диапазона Pc1 установлена их тесная взаимосвязь. Для всех рассмотренных форм протонных сияний и соответствующих им пульсаций, в частности показано: что:

- для наземных станций, расположенных вблизи проекций сияний, время наблюдения пульсаций и сияний совпадает;
- максимум широтного распределения интенсивности пульсаций совпадает с широтным положением сияний;
- широты (широтные размеры) сияний обратно пропорциональны частотам (частотным диапазонам) соответствующих им пульсаций.

Подобная взаимосвязь сияний и пульсаций является убедительным доказательством того, что механизмом, ответственным за субавроральные протонные сияния (как и за генерацию пульсаций диапазона Pc1), является ионно-циклотронная неустойчивость. Пространственное совпадение проекций всех рассмотренных форм сияний (высыпаний протонов) с максимумом в широтном распределении интенсивности пульсаций подтверждает возможность дактированного распространения ЭМИЦ волн от

магнитосферного источника к ионосфере. Пространственно-временные характеристики рассмотренных типов сияний и пульсаций связаны с особенностями динамики и пространственного распределения горячей и холодной плазмы в магнитосфере. Таким образом, наблюдения субавроральных протонных сияний, представляющих двухмерное изображение области ионно-циклотронного взаимодействия в приземной экваториальной магнитосфере, предоставляют возможность не только для диагностики областей ионно-циклотронного взаимодействия, но и градиентов холодной плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы.

Авторы благодарны Х. Фрею (Калифорнийский университет, Беркли, США), Т. Безингеру (Университет г. Оулу, Финляндия) и Ю. Маннинену (обс. Соданкюля, Финляндия) за сотрудничество при выполнении работ, а также сотрудникам Полярного геофизического института КНЦ РАН и Геофизической обс. Соданкюля, обеспечивающим наблюдения на сети индукционных магнитометров. Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4/8, и программы ОФН № VI. 15.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Yahnina T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J. Evans D.S., Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Yu., Thomsen M.F., Reeves G.D., Gvozdevsky B.B.* Energetic particle counterparts for geomagnetic pulsations of Pc1 and IPDP types // Ann. Geophys. 2003. Vol. 21. P. 2281-2292. 2. Frey, H.U. Localized aurora beyond the auroral oval // Rev. Geophys. 2007. Vol. 45, RG1003, doi:10.1029/2005RG000174. 3. *Frey H.U., Haerendel G., Mende S.B., Forrester W.T., Immel T.J., Ostgaard N.* Subauroral morning proton spots (SAMPS) as a result of plasmapause-ring-current interaction // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. A10305, doi:10.102 9/2004JA010516. 4. *Burch, J.L., Lewis W.S., Immel T.J., Anderson P.C., Frey H.U., Fuselier S.A., Ge´rard J.-C., Mende S.B., Mitchell D.G., Thomsen M.F.* Interplanetary magnetic field control of afternoon-sector detached proton auroral arcs // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107(A9). 1251, doi:10.1029/2001JA007554. 5. *Immel T.J., Mende S.B., Frey H.U., Peticolas L.M., Carlson C.W., Gerard J.-C., Hubert B., Fuselier S.A., and Burch J.L.* Precipitation of auroral protons in detached arcs // Geophys. Res. Lett. 2002. Vol. 29(11), 1519, doi:10.1029/2001GL013847. 6. *Zhang, Y., Paxton L.J., Immel T.J., Frey H.U., and Mende S.B.* Sudden solar wind dynamic pressure enhancements and dayside detached auroras: IMAGE and DMSP observations // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. 8001, doi:10.1029/2002JA009355. 7. *Fuselier, S.A., Gary S.P., Thomsen M.F., Claflin E.S., Hubert B., Sandel B.R., and Immel T.* Generation of transient dayside subauroral proton precipitation // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. A12227, doi:10.1029/2004JA010393. 8. *Fukunishi, H., Toya T., Koike K., Kuwashima M., Kawamura M.* Classification of hydromagnetic emission based on frequency-time spectra // J. Geophys. Res. 1981. Vol. 86. P. 9029-9039. 9. *Yahnin A.G., Yahnina T.A.* Energetic proton precipitation related to ion–cyclotron waves // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. Vol. 69. P. 1690–1706. 10. *Yahnin A.G., Yahnina T.A., Frey H.U.* Subauroral proton spots visualize the Pc1 source // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. A10223, doi:10.1029/2007JA012501. 11. *Яхнин А.Г., Яхнина Т.А., Фрей Х.У.* Идентификация источников геомагнитных пульсаций Pc1 на основе наблюдений протонных сияний // Косм. Исслед. 2008. Т. 46. № 4 С. 344-347. 12. *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. 2008. Vol. 113, A07209, doi:10.1029/2008JA013099. 13. *Yahnin A.G., Yahnina T.A., Frey H.U., Bosinger T., Manninen J.* Proton aurora related to Intervals of pulsations of diminishing periods // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114, A12215, doi:10.1029/2009JA014670. 14. *Попова Т.А., Яхнин А.Г., Яхнина Т.А. Фрей Х.* Взаимосвязь между резкими увеличениями динамического давления солнечного ветра, вспышками протонных сияний и геомагнитными пульсациями в диапазоне Pc1 // Космические исследования, 2010. Т 50 (5). С. 568-575. 15. *Mende S.B., Heetderks H., Frey H.U., Lampton M., Geller S.P., Habraken S., Renotte E., Jamar C., Rochus P., Spann J., Fuselier S.A., Gerard J.-C., Gladstone R., Murphree S., Cogger L.* Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 1. System design // Space Sci. Rev. 2000. Vol. 91. P. 243 –270. 16. *Evans D.S., Greer M.S.* Polar orbiting environmental satellite space environment monitor. 2: Instrument descriptions and archive data documentation // NOAA Technical Memorandum OAR SEC-93, Boulder, 2000. 17. *Tepley L.R., Wentworth R.C. Hydromagnetic emission, Xrays, and electron bunches*, 1. Experimental results // J. Geophys. Res. 1962. Vol. 67. P. 3317-3334. 18. *Троицкая В.А., Матвеева Е.Т., Иванов К.Г., Гульельми А.В.* Вариации частоты микропульсаций Pc1 во время внезапных деформаций магнитосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1968. Т. 8. С. 975-976. 19. *Пархомов В.А., Довбня Б.В., Луковникова В.И.* О природе колебаний с нестационарным спектром во время SSC // Геомагнетизм и аэрономия, 1985. Т. 26. С. 1036-1038. 20. *Пархомов В.А., Застенкер Г.Н., Рязанцева М.О., Цегмед Б., Попова Т.А.* Всплески геомагнитных пульсаций в диапазоне частот 0.2-5 Гц, связанные с большими скачками давления солнечного ветра // Космические исследования, 2010. Т. 48. С. 86- 100. 21. *Kangas J., Aikio A., Olson J.V.* Multistation correlation spectra associated with sudden impulses // Planet. Space Sci. 1986. Vol. 34. P. 543-553. 22. *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. 1996. Vol. 23. P. 769-772. 23. *Spasojevic M., Fuselier S.A.* Temporal evolution of proton precipitation associated with the plasmaspheric plume // J. Geophys. Res, 2009. Vol. 114. A12201. doi:10.1029/2009JA014530. 24. *Spasojevic´ M., Frey H.U., Thomsen M.F., Fuselier S.A., Sandel B.R., Inan U.S.* The link between a detached subauroral proton arc and a plasmaspheric plume // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. L04803, doi:10.1029/2003GL018389. 25. *Olson J.V., Lee L.C.* Pc1 wave generation by sudden impulses // Planet. Space Sci. 1983. Vol. 31. P. 295-302. 26. *Hansen, H.J., Fraser B.J., Menk F.W., Erlandson R. E.* Ground satellite observations of Pc 1 magnetic pulsations in the plasma trough // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100(A5). P. 7971-7985.

Сведения об авторах

Яхнина Татьяна Андреевна – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, e-mail: yahnina@pgia.ru

Яхнин Александр Григорьевич – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, зав. лабораторией, e-mail: yahnin@pgia.ru