

Геомагнитная Буря и Солнечная Активность в Низкочастотных Шумах

Larkina V.I.

IZMIRAN, Troitsk town, Moscow region, 142190. Russia larkina@izmiran.ru

Получена комплексная картина развития геомагнитной бури на высотах внешней ионосферы по одновременно зарегистрированным вариациям интенсивности низкочастотных шумовых излучений (0.1 - 20 кГц) и плотности потока энергичных электронов ($E_e \geq 40$ кэВ). Проанализированные результаты отражают процессы перестройки магнитосферной плазмы в спокойных условиях и в разные фазы геомагнитной бури. Во время геомагнитных возмущений возросла плотность потока энергичных частиц и интенсивность шумов, максимумы интенсивности сдвинулись ближе к Земле ($L=2.5-3.5$). Спектр шумов расширился в сторону более высоких широт. В восстановительную фазу бури плотность потоков энергичных квазизахваченных частиц долго сохранялась повышенной, максимум шумов отодвинулся на $L=4-5$. Установлена зависимость интенсивности низкочастотных шумов от солнечной активности. Показано, что электромагнитные низкочастотные шумы могут быть своеобразным индикатором геомагнитной и солнечной активности.

Введение

Интенсивность и спектр низкочастотных излучений (0.1-20 кГц) излучений, регистрируемых на высотах внешней ионосферы зависят от свойств плазмы (плотности и температуры окружающей плазмы), в которой они возбуждаются и распространяются. Во время геомагнитных возмущений происходят изменения параметров среды, варьируется спектр и потоки энергичных частиц, меняется геомагнитное поле, что отражается в характеристиках и динамике низкочастотных излучений.

Развитие геомагнитной бури в низкочастотных шумах

Во время геомагнитных бурь происходит пополнение радиационных поясов новыми «свежими частицами», пространственное перемещение радиационных поясов, высыпание электронов, и, как следствие, возбуждение низкочастотных шумовых излучений и перемещение в пространстве области генерации низкочастотных шумов. Исследование одновременных вариаций интенсивности низкочастотных шумовых излучений и плотности потока энергичных электронов демонстрирует эти изменения.

На рис. 1 приведены вариации магнитной компоненты (вариации электрической составляющей аналогичны) на частоте 170 Гц (рис. 1а), плотности потока квазизахваченных E_{\perp} (рис. 1б) и высыпающихся E_{\parallel} (рис. 1с) электронов ≥ 40 кэВ. Информация приведена для трех витков спутника, проходивших в одной и той же области пространства (южное полушарие, день, апекс траектории над Австралией). До бури информация приведена сплошными линиями, во время возмущения штриховыми линиями, после бури – пунктиром.

В спокойное время в распределении плотности потоков квазизахваченных электронов четко прослеживаются структуры внутреннего и внешнего радиационных поясов (см. рис. 1б). В спокойное время максимум интенсивности шумов регистрировался, как всегда, на $L=4\div 5$, т.е. в области, под сводом плазмопаузы, где они, скорее всего, и возбуждаются. Максимум

интенсивности шумов наблюдался в области зазора между радиационными поясами и примыкающей к нему областью внутренней границы внешнего радиационного пояса.

Во время главной фазы бури возросла плотность потока квазизахваченных электронов, внутренняя граница внешнего радиационного пояса переместилась ближе к Земле. Плотность потока частиц внутреннего радиационного пояса также возросла.

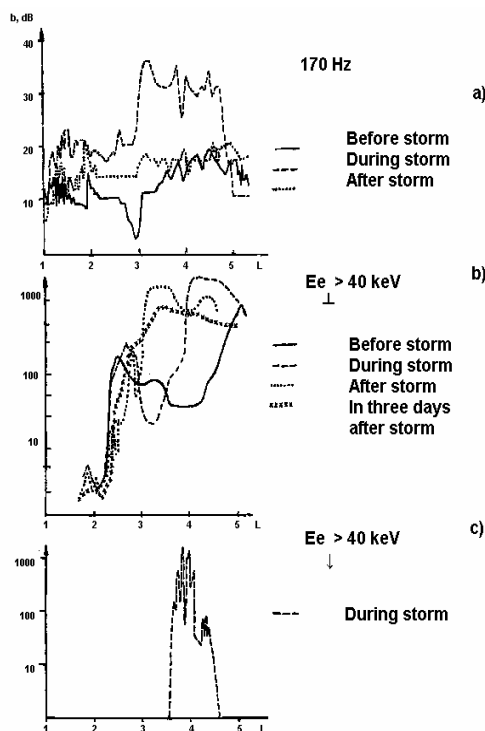


Рис.1

Изменения произошли и в распределении интенсивности низкочастотных излучений (см. рис. 1). Во время бури значительно возросла интенсивность шумов, максимум интенсивности зарегистрирован на $L=3\div 4.5$, то есть ближе к Земле. Максимум интенсивности наблюдался в области зазора между радиационными

поясами и внутренней кромкой внешнего радиационного пояса. В это же время были зарегистрированы интенсивные потоки высыпающихся электронов в области зазора между радиационными поясами и примыкающей к зазору внутренней границей внешнего радиационного пояса, то есть в той же области, где регистрировались наиболее интенсивные шумовые излучения. Во время возмущений было зарегистрировано появление одновременных мелкомасштабных флуктуаций интенсивности низкочастотных шумов и плотности потока энергичных электронов в области максимальной интенсивности шумов.

Когда заканчивается приток новых частиц, кольцевой ток постепенно уменьшается в течение от одного до нескольких дней. Экспериментальные данные и данные расчетов позволили сделать вывод, что основным механизмом потерь электронов из радиационных поясов является питч-угловая диффузия этих частиц, вызванная высокочастотной турбулентностью, то есть генерацией низкочастотных излучений. В процессе питч-угловой диффузии энергичные электроны попадают в зону конуса потерь и высыпаются в ионосферу, вызывая дополнительную ионизацию. Теоретические исследования показали, что интенсивность низкочастотных излучений определяет предельно допустимые потоки захваченных энергичных частиц во внешнем радиационном поясе $L > 3$, определяя время жизни захваченных и высыпающихся электронов. За это время магнитное поле постепенно возвращается к своему обычному состоянию и заканчивается восстановительная фаза бури.

В восстановительную фазу бури наблюдалось значительное увеличение интенсивности ОНЧ излучения до $\sim 10^{-3} \gamma/\sqrt{\text{Гц}}$ (иногда до $5 \cdot 10^{-3} \gamma/\sqrt{\text{Гц}}$). К моменту окончания главной фазы бури возросла плотность потока энергичных электронов, особенно в области внешнего радиационного пояса, зазор между поясами частично заполнился и, как бы, сжался и переместился на $L \sim 3.2 \div 3.3$. Во время восстановительной фазы бури потоки квазизахваченных электронов сохраняются достаточно интенсивными. Через 3 дня после бури поток частиц стал уменьшаться. Так же, как и во время бури и до бури, излучения наиболее интенсивны в районе зазора между радиационными поясами и внутренней границей внешнего радиационного пояса. В области, где излучение максимально, наблюдались потоки высыпающихся электронов (см. рис. 1с). Интенсивность низкочастотных шумов также уменьшилась и достигла уровня, наблюдаемого до бури (до возмущения). Максимальная интенсивность шумов наблюдалась на $L=4-5$, то есть на тех же L -оболочках, что и до бури.

Во время восстановительной фазы максимум излучения сдвигается к более высоким L -оболочкам ($L=4-5$). Однако не всегда к концу восстановительной фазы уровень излучения снижается до уровня, присущего спокойному периоду - достаточно интенсивное излучение сохраняется еще некоторое время.

После окончания бури потоки квазизахваченных электронов на $3 < L < 4.5$ все еще достаточно велики.

Пространственная структура потоков даже через 3 дня после окончания бури достаточно сложная, особенно, в области внутреннего радиационного пояса, на $L < 3$ заметен ряд максимумов и минимумов. В области $L \sim 4$ наблюдается формирование нового зазора между радиационными поясами. Если принять, что минимум потоков электронов на $L \sim 4$ в это время соответствует новому положению зазора между радиационными поясами, то в этом случае заметно отмеченное выше взаимное соответствие в положении зазора и максимума амплитуды. Зазор между радиационными поясами не очень ярко выражен и находится, по-видимому, на $L \sim 4$. После окончания геомагнитной бури излучение все еще достаточно интенсивное и максимум его находится на $L \sim 2.5$.

В ходе развития магнитной бури произошли существенные изменения в спектре низкочастотных излучений. В спокойное время наибольший уровень излучений отмечен на частотах 140-800 Гц, во время бури спектр расширился до 2.5-4 кГц.

Из рисунка видно, что в ходе развития магнитной бури происходит перемещение ближе к Земле радиационных поясов и максимума интенсивности шумов. Такие вариации потоков энергичных частиц во время бури называются диффузионной волной. Область возбуждения низкочастотных излучений в экваториальной области магнитосферы испытывают пространственное перемещение одновременно с радиационными поясами, следуя за так называемой диффузионной волной. На основании сопоставления перемещения максимумов интенсивности низкочастотных излучений и потоков энергичных электронов различных энергий определена скорость диффузионной волны разных энергетических компонент в разные фазы бури (~ 6500 км/час).

Таким образом, установлено, что во время главной фазы возмущения на высотах внешней ионосферы: возрастает плотность потока энергичных электронов ($E \geq 40$ кэВ), зазор между радиационными поясами сужается и перемещается на более низкие L -оболочки ($L=2.5-3$), рост интенсивности шумов на 20-25 дБ, в зависимости от степени геомагнитной возмущенности до бури. При этом, как правило, максимум составляет $10^{-4} \gamma/\sqrt{\text{Гц}}$, исключение составила только буря 16.08.1970, когда во время главной фазы бури амплитуда излучений достигла предельного уровня $5 \cdot 10^{-3} \gamma/\sqrt{\text{Гц}}$, максимум излучений перемещается ближе к Земле, на более низкие L -оболочки, так во время очень сильной бури в августе 1970г., максимум излучений был отмечен на $L=2.2$. Происходят существенные изменения в спектре излучений. В спокойное время наибольший уровень излучений в спектре отмечен на частотах 140-800 Гц, в главную фазу бури спектр расширился до 2,5-4 кГц.

Во время восстановительной фазы бури происходит: высыпание энергичных частиц из радиационных поясов, возбуждение низкочастотных шумов этими частицами, точнее, более интенсивное возбуждение шумовых излучений, в зависимости от силы бури изменяется время, в течение которого максимум интенсивности

излучения после магнитного возмущения возвращается на $L \sim 4 \div 5$.

Таким образом, мы видим, что вариации низкочастотных излучений отражают процессы перестройки околоземной космической плазмы во время геомагнитных возмущений и бурь: пополнение и потери энергичных частиц в радиационных поясах, перемещение радиационных поясов (диффузионная волна) и перемещение плазмопаузы.

Оценены пространственно-временные изменения амплитуды шумов: во время возмущений происходит перемещение максимума (L_{max}) излучений ближе к Земле, во время восстановительной фазы бури происходит обратное перемещение, максимум шумов отдаляется от Земли (T). Минимум, до которого смещается максимум излучений и скорость этих перемещений зависят от мощности бури. См. табл. 1.

Таблица 1 Средние характеристики изменения амплитуды шумовых излучений в ходе развития магнитных бурь

Характеристика магнитной бури	Максимальная интенсивность $\gamma / \sqrt{\text{Гц}}$	L_{max}	T дней
Малая	$< 10^{-4}$	3.5	-
Средняя	$\sim 10^{-4}$	2.5	1.5-2
Большая	$\geq 5 \cdot 10^{-3}$	2-2.5	до 4-х

Каждая магнитная буря имеет свои характерные особенности и отличается в некоторых отношениях от всех прочих бурь. Все же некоторые общие характерные особенности проявляются во многих (возможно, в большинстве) геомагнитных бурь.

Несмотря на особенности пространственно-временных изменений интенсивности излучений, присущих каждой отдельной буре, в среднем, интенсивность шумов растет (линейно) с увеличением Dst вариаций. На рис. 2 представлены вариации интенсивности излучений на

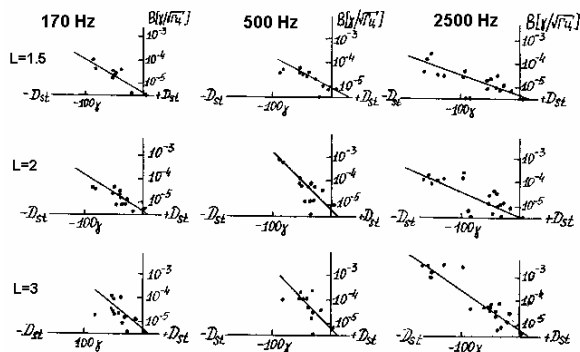


Рис. 2

нескольких частотах для различных L -оболочках в зависимости от величины Dst . Из рисунка ясно видно, что скорость роста уровня излучений увеличивается пропорционально величине Dst -вариаций, также скорость роста излучений растет с увеличением величины L -оболочки. Рост амплитуды излучений с Dst несколько отличается на разных частотах. Связь роста амплитуды с Dst отражает увеличение количества частиц в радиационных поясах, приводящее к возрастанию энергии кольцевого тока.

Подобные сопоставления с другими индексами геомагнитной активности (K_p , A_e) не дают таких

согласованных результатов, как с величиной Dst . По-видимому, это может быть объяснено тем обстоятельством, что Dst -вариации отражают геомагнитную возмущенность именно в той области магнитосферы, где происходит возбуждение плазмосферных шумов.

Низкочастотные излучения и кольцевой ток

По результатам экспериментов на ИСЗ «Интеркосмос» трудно разделить частицы кольцевого тока и частицы радиационного пояса. К сожалению, спутники «Интеркосмос» не пересекали экваториальные области кольцевого тока ($L \sim 5 - 8$), а существовали только на ионосферных высотах.

Мы проанализировали одновременные пространственно-временные вариации интенсивности низкочастотных излучений, потоков протонов и электронов, полученные на малых высотах (высота ИСЗ «Интеркосмос 5» не превышала 800 км.) и вариации частиц кольцевого тока (данные «Explorer 45») в области экватора, когда спутники находились на одной и той же L -оболочке в близкое местное время.

На основании совместного рассмотрения данных двух спутников, мы установили, что:

- области, где амплитуда излучений максимальна, где эти излучения скорее всего возбуждаются, и области кольцевого тока совпадают или очень близки, во время геомагнитного возмущения происходят аналогичные пространственные перемещения этих областей,
- положение среднего радиуса кольцевого тока по наблюдениям низкочастотных излучений согласуется с известными наблюдениями частиц кольцевого тока и красными дугами
- по полученным сведениям о перемещении области генерации низкочастотных излучений можно судить об изменениях среднего радиуса кольцевого тока и скорости этого изменения, средняя скорость перемещения к Земле области кольцевого тока и максимума шумов равна ~ 4150 км/час.
- кроме того, о возможности возбуждения частиц низкочастотных излучений частицами кольцевого тока, говорит тот факт, что чем сильнее магнитная буря, тем дольше сохраняется повышенный уровень интенсивности низкочастотных излучений и также достаточно длительное время распада кольцевого тока.

Низкочастотные шумы и солнечная активность

Солнечная активность - это комплекс различных явлений, происходящих в атмосфере Солнца и отличающихся значительными изменениями физических характеристик различных слоев солнечной атмосферы. Эти явления сопровождаются изменениями потока энергии от Солнца, что, в свою очередь, приводит к изменениям магнитосферной плазмы и к вариациям низкочастотных электромагнитных шумов, как одной из составляющих космической плазмы окружающей Землю.

При увеличении солнечной активности вырастают также и потоки энергичных частиц в магнитосфере. Это

связано с увеличением притока энергичных частиц из межпланетного пространства и с общим сжатием магнитосферы под воздействием возрастающего солнечного ветра. Эти факторы неизбежно влекут за собою увеличение интенсивности низкочастотных излучений. Рассмотрим вариации интенсивности шумов, полученных по данным различных спутников. Аппаратура волновых комплексов была однотипной и во всех экспериментах сохранялись основные параметры: чувствительность, динамический диапазон, частоты настройки каналов, относительные полосы пропускания каналов и т.д. Это позволило накопить однородный материал пригодный для статистической обработки и сопоставления электромагнитных шумов при различных условиях солнечной активности.

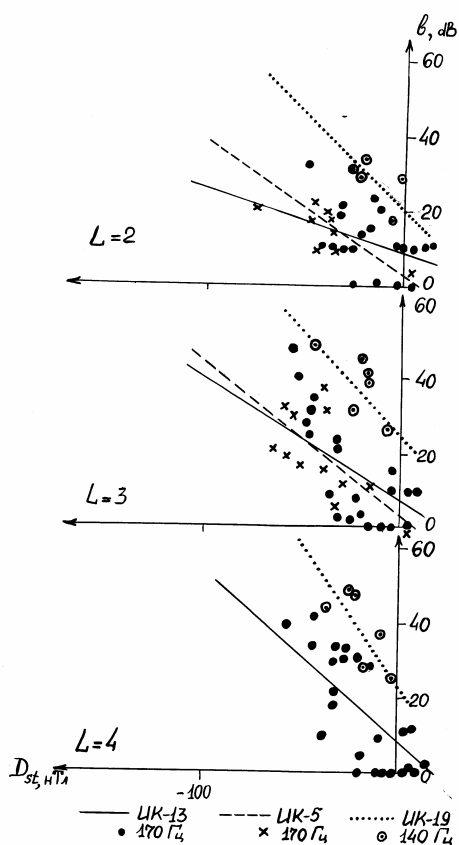


Рис.3

Спутники “Интеркосмос 13” (ИК-13) и “Интеркосмос 14” функционировали в минимуме солнечной активности, спутники “Интеркосмос 3” (ИК-3) и “Интеркосмос 5” (ИК-5) - при средней солнечной активности. Измерения на спутниках “Интеркосмос 18” (ИК-18) и “Интеркосмос 19” (ИК-19) проводились во время максимальной солнечной активности. На спутнике “Ореол 3 - в максимуме цикла и при меньшей активности. Спутник “Космос 1809” работал в сложное время - время перехода солнечной активности от минимума к максимуму.

В качестве показателя уровня возмущенности использовались данные Dst - вариаций. Dst - вариации - усредненная по долготе величина возмущения магнитного поля в средних широтах. Наиболее полные данные по волновым экспериментам относятся к

плазмосфере, поэтому использование данных Dst - вариаций вполне оправдано.

В ходе анализа результатов волновых экспериментов на спутниках было обнаружено, что амплитуда низкочастотных излучений увеличивается с ростом солнечной активности и расширяется область, занятая интенсивным излучением. Так, по измерениям на спутнике (ИСЗ “Интеркосмос 13”) в магнитоспокойное время $|Dst| \leq 30$ nT на $L \approx 4,5 \div 5$ амплитуда излучений составляла $5 \cdot 10^{-3}$ nT \cdot Гц $^{-1/2}$ на частоте 170 Гц, 10^{-4} nT \cdot Гц $^{-1/2}$ - на частоте 720 Гц и 10^{-5} nT \cdot Гц $^{-1/2}$ на частоте 4 кГц. По спутниковым данным в максимуме солнечной активности область с интенсивным излучением расширилась ($4 < L < 6$) и амплитуда излучений составляла $3 \cdot 10^{-4}$ nT \cdot Гц $^{-1/2}$ для $f = 170$ Гц, $7 \cdot 10^{-4}$ nT \cdot Гц $^{-1/2}$ для $f = 720$ Гц и $3 \cdot 10^{-4}$ nT \cdot Гц $^{-1/2}$ для частоты 4650 Гц при такой же величине $|Dst| \leq 30$ nT.

За время волновых экспериментов на спутниках геофизическая обстановка была разнообразной. При исследовании вариаций амплитуды излучений в разные фазы цикла солнечной активности была возможность сопоставлять вариации амплитуды шумов в спокойное ($0 \leq Kp \leq 2+$) и умеренно возмущенное ($3 \leq Kp \leq 4+$) время. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 Амплитуда излучений (нТ \cdot Гц $^{-1/2}$) на разных частотах в минимуме и максимуме солнечной активности

Солнечная активность	Частоты настройки каналов, Гц	Амплитуда излучений при геомагнитной активности	
		$0 \leq Kp \leq 2+$	$3 \leq Kp \leq 4+$
Минимум	170	$5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
	720	10^{-4}	$4 \cdot 10^{-4}$
	4000	10^{-5}	$4 \cdot 10^{-5}$
Максимум	140	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	800	$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	4650	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-4}$

Ранее было установлено, что в среднем, по многим геомагнитным возмущениям амплитуда шумовых низкочастотных излучений изменяется пропорционально Dst - вариации. Скорость роста амплитуды излучений различна для разных частот и увеличивается с переходом к более высоким L-оболочкам. При сопоставлении изменений амплитуды в разные фазы цикла солнечной активности эти выводы получили новое подтверждение; было также установлено, что скорость роста амплитуды шумов с увеличением Dst зависит от солнечной активности.

На рис. 3 представлено изменение уровня излучения на частоте 170 Гц (140 Гц) на различных L-оболочках ($L=2, L=3, L=4$) в зависимости от величины Dst-вариаций. По вертикали отложена амплитуда излучений “b” по отношению к уровню собственных шумов. Данные спутника “Интеркосмос 13” относятся к минимуму солнечной активности, “Интеркосмос 19” - к максимуму, “Интеркосмос 5” - к промежуточной активности. Из рисунка ясно видно, что с усилением солнечной активности скорость роста уровня излучений с изменением величины Dst возрастает. Связь амплитуды излучений с Dst - вариацией отражает увеличение количества частиц в радиационных поясах, приводящее к возрастанию энергии кольцевого тока.