

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ШУМЫ НА ВЫСОТАХ ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ И СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

В.И. Ларкина

LOW-FREQUENCY NOISES AT OUTER IONOSPHERE ALTITUDES AND SOLAR ACTIVITY

V.I. Larkina

Исследованы результаты регистрации интенсивности низкочастотных электромагнитных излучений на высотах внешней ионосферы по спутниковым данным при различном уровне солнечной активности.

Установлено, что интенсивность низкочастотных излучений зависит от солнечной активности, изменяются пространственные характеристики шумов. В работе приведены среднестатистические значения изменений амплитуды шумов в разные фазы цикла солнечной активности.

Показано, что низкочастотное излучение служит источником информации о процессах, протекающих в приземной плазме, в частности, по ним судят о состоянии радиационных поясов. Шумы несут информацию об изменениях потоков частиц, вторгающихся в плазмосферу Земли, различных условиях солнечной активности и об изменениях магнитосферной плазмы, связанных с ростом солнечной активности. Другими словами, электромагнитные низкочастотные шумы могут быть своеобразным индикатором солнечной активности и состояния магнитосферы.

I investigated the results of registering the low-frequency electromagnetic radiation intensity at altitudes of the outer ionosphere from satellite data at various levels of solar activity.

I revealed that the low-frequency radiation intensity depended on solar activity, i.e., spatial characteristics of noise variation. In the paper there are mean values of noise amplitude variations at different phases of a solar activity cycle.

I show that low-frequency radiations are an information source on the processes progressing in the surface plasma, in particular, one may judge of radiation belts state by them. Noise carries the information on variations of the particle fluxes breaking into the Earth plasmasphere in different conditions of solar activity and on the variations of the magnetospheric plasma related to solar activity growth. In other words, electromagnetic low-frequency noise can be a peculiar indicator of the solar activity and the state of the magnetosphere.

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. Это, 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 [1]. 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.

Солнечная активность характеризуется большим разнообразием циклов различной длительности, наибольший интерес, с нашей точки зрения, представляют 11-летние циклы. Лучше всего 11-летний цикл солнечной активности выделяется по числам Вольфа.

На рис. 1, представляющем солнечную активность в числах Вольфа R_z с 1966 по 1994 г., показано время проведения волновых экспериментов на спутниках серии «Интеркосмос» и некоторых других. Заметим, что 21 цикл был очень сложным и Солнце было существенно более активным, чем в 20-м цикле. В нижней части рисунка жирными отрезками показано время активного существования спутников, информация с которых будет обсуждаться.

Аппаратура волновых комплексов была однотипной и во всех экспериментах сохранялись ее основные параметры: чувствительность, динамический диапазон, частоты настройки каналов, относительные полосы пропускания каналов, постоянные временные детекторов заряда и разряда. Это позволило накопить однородный материал, пригодный для статистической обработки и сопоставления вариаций амплитуды электромагнитных шумовых излучений при различных условиях солнечной активности.

Эксперимент на ИСЗ «Интеркосмос-3» (ИК-3) пришелся на середину 20 цикла солнечной активности [2]. Эксперимент на спутнике «Интеркосмос-5» (ИК-5) проводился при меньшей солнечной активности [3]. Спутники «Интеркосмос-13» (ИК-13) и «Интеркосмос-14» функционировали в минимуме солнечной активности [4]. Волновые измерения на спутниках «Интеркосмос-18» (ИК-18) и «Интеркосмос-19» (ИК-19) проводились во время максимальной солнечной активности [5]. На спутнике «Ореол-3» [5] – в максимуме цикла и при меньшей активности. Спутник «Космос-1809» (К-1809) работал в сложное время перехода солнечной активности от минимума к максимуму [6].

Наклон орбиты спутника «Интеркосмос-13» к плоскости экватора составлял 82° , спутника «Интеркосмос 18» – 83° и «Интеркосмос-19» и «Космос-1809» – 74° . Наклон орбиты ИСЗ «Интеркосмос-3» «Интеркосмос-5» к плоскости эклиптики составлял 48° , максимальные L-оболочки, которых достигал спутники, были всего лишь $L = 4.5-5$, т. е. спутники

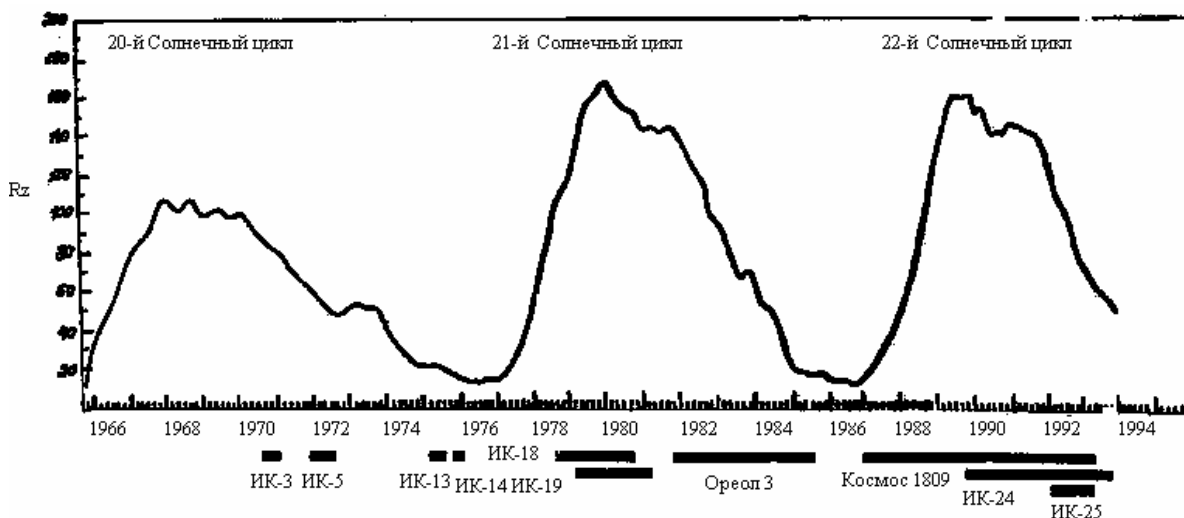


Рис. 1. Солнечная активность и волновые эксперименты.

«Интеркосмос-3» и «Интеркосмос-5» находились внутри плазмосферы.

В качестве показателя уровня возмущенности использовались данные D_{st} -вариаций. D_{st} -вариации – усредненная по долготе величина возмущения магнитного поля в средних широтах. Наиболее полные данные по волновым экспериментам относятся к плазмосфере, поэтому использование данных D_{st} -вариаций вполне оправдано.

В ходе анализа результатов волновых экспериментов на спутниках было обнаружено, что амплитуда магнитной компоненты поля низкочастотных излучений увеличивается с ростом солнечной активности и расширяется область, занятая интенсивным излучением. Так, по измерениям (ИСЗ «Интеркосмос-13») в магнитоспокойное время $|D_{st}| \leq 30$ нТл на $L \approx 4.5-5$ амплитуда излучений составляла $5 \cdot 10^{-3}$ нТл·Гц $^{-1/2}$ на частоте 170 Гц, 10^{-4} нТл·Гц $^{-1/2}$ – на частоте 720 Гц и 10^{-5} нТл·Гц $^{-1/2}$ на частоте 4 кГц. В максимуме солнечной активности область с интенсивным излучением расширилась ($4 < L < 6$) и амплитуда излучений составляла $3 \cdot 10^{-4}$ нТл·Гц $^{-1/2}$ для $f = 170$ Гц, $7 \cdot 10^{-4}$ нТл·Гц $^{-1/2}$ для $f = 720$ Гц и $3 \cdot 10^{-4}$ нТл·Гц $^{-1/2}$ для частоты 4650 Гц при такой же величине $|D_{st}| \leq 30$ нТл.

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 ($0 \leq K_p \leq 2+$) и умеренно возмущенное ($3- \leq K_p \leq 4+$) время. Результаты приведены в таблице.

Ранее [7] нами было установлено, что в среднем по многим геомагнитным возмущениям амплитуда шумовых низкочастотных излучений изменяется пропорционально D_{st} -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 D_{st} зависит от солнечной активности.

Амплитуда излучений (нТл·Гц $^{-1/2}$) на разных частотах в минимуме и максимуме солнечной активности

Солнечная активность	Частота настройки каналов, Гц	Амплитуда излучений при геомагнитной активности	
		$0 \leq K_p \leq 2+$	$3- \leq K_p \leq 4+$
Минимум	170	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$
	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}	$5 \cdot 10^{-4}$

На рис. 2 представлено изменение уровня излучения на частоте 170 Гц (140 Гц) на различных L-оболочках ($L=2, L=3, L=4$) в зависимости от вели-

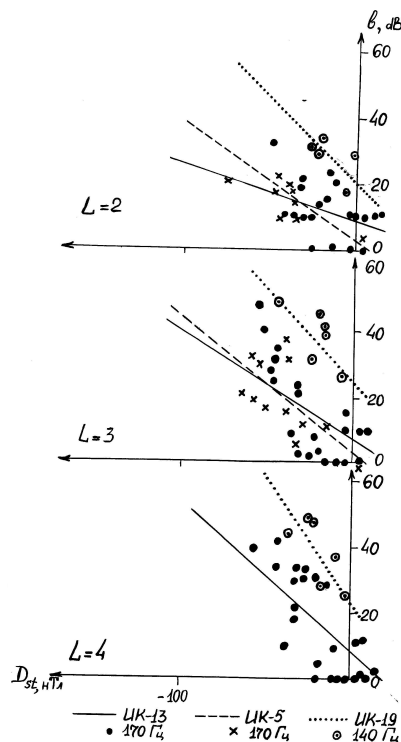


Рис. 2. Изменение интенсивности низкочастотного излучения в зависимости от величины D_{st} -вариаций в различных условиях солнечной активности.

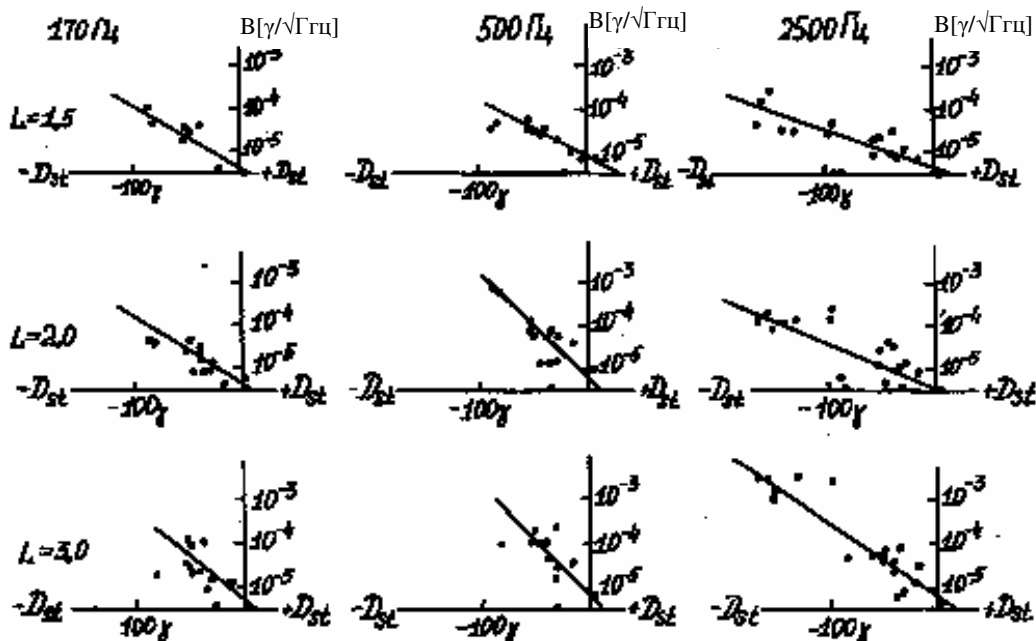


Рис. 3. Изменение интенсивности низкочастотного излучения в зависимости от величины D_{st} -вариаций.

чины D_{st} -вариаций. По оси ординат отложена амплитуда излучения 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 D_{st} возрастает. Связь амплитуды излучений с D_{st} -вариацией отражает увеличение количества частиц в радиационных поясах, приводящее к возрастанию энергии кольцевого тока [8].

На рис. 3 приведены статистические данные зависимости амплитуды (дБ) шумов на разных частотах от величины D_{st} -вариаций, полученные на спутниках «Интеркосмос-18» и «Интеркосмос-19», работавших в максимуме солнечной активности 21 цикла. Заметим, что 21 цикл был очень сложным и Солнце было существенно более активным, чем в 20 цикле.

В качестве примера показаны вариации интенсивности излучения на частоте 170 (140) Гц с изменением величины D_{st} -вариаций при различных условиях солнечной активности в зависимости от величины параметра L -оболочки. Из рисунка видно, что скорость роста увеличивается с усилением солнечной активности. Подобные результаты получены для излучений на других частотах.

Сопоставление с другими индексами геомагнитной активности (K_p , AE) не дает таких согласованных результатов, как с величиной D_{st} . По-видимому, это согласие можно объяснить тем обстоятельством, что из разнообразных индексов геомагнитной возмущенности D_{st} -вариации наиболее подходят для характеристики интенсивности и положения области возбуждения плазмосферного излучения. Это связано с тем, что указанные значения наблюдаются в районе, где находится экваториальное токовое кольцо, и амплитуда излучения обусловлена энерги-

ей кольцевого тока или количеством энергичных частиц, проникающих каким-либо путем во время бури в магнитосферу.

Известно, что квадрат интенсивности плазмосферного шумового низкочастотного излучения пропорционален $b^2 \sim N_0(dN_2/dt)$, где N_0 – концентрация холодной плазмы, dN_2/dt – скорость притока энергичных частиц в область возбуждения.

Рост концентрации плазмы и увеличение притока энергичных частиц согласно [9] должны приводить к увеличению b^2 . Далее известно, что возбуждение волн возможно при условии

$$\gamma = \Omega \eta A > 0,$$

где γ – инкремент неустойчивости, Ω – гирочастота электронов, η – число частиц, вступающих в резонансное взаимодействие, A – анизотропия функции распределения электронов, Ω и η всегда положительны, следовательно, $\gamma > 0$, если $A > 0$.

Из литературы известно [10], что анизотропия днем выше, чем ночью. Можно предположить, что при усилении солнечной активности анизотропия функции распределения электронов возрастает, увеличивается также и число частиц, вступающих в резонансное взаимодействие. Все это приводит к тому, что легче выполняется условие возбуждения волн и интенсивность возбуждаемых волн становится больше.

Таким образом, из анализа результатов низкочастотных волновых измерений, выполненных на спутниках «Интеркосмос» в разные фазы цикла солнечной активности, установлено, что интенсивность низкочастотных излучений растет с ростом солнечной активности и в максимуме солнечной активности выше, чем в минимуме. Обнаружено также различие скоростей роста амплитуды с развитием геомагнитной возмущенности в разные фазы цикла солнечной активности.

Полученная информация позволяет судить об изменениях плотности потока и энергии частиц, вторгающихся в плазмосферу Земли в годы максимума и минимума солнечной активности. Другими словами, электромагнитные низкочастотные шумы могут быть своеобразным индикатором солнечной активности и состояния магнитосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Solar Geophysical Data. May 1994. Number 597. Part 2. P. 11.
2. Вернова Л.В., Войта Я., Иржичек Ф. и др. Регистрация низкочастотных излучений и сигналов на спутнике «Интеркосмос-3» // Космические исследования. 1970. Т. 10. С. 82–91.
3. Yiricek F., Triska P., Voita Ya., et al. VLF experiment with the Intercosmos 5 satellite // Studia Geophysica et Geodetika. 1973. V. 17. P. 49–52.
4. Yiricek F., Triska P., Voita Ya., et al. ELF electric field measurements with the Intercosmos satellite // Studia Geophysica et Geodetika. 1976. V. 20. P. 72–79.
5. Воробьев О.В., Коробовкин В.В., Лихтер Я.И. и др. Приемная аппаратура для регистрации естественных низкочастотных сигналов и шумов АНЧ-2МЕ // Аппаратура для исследования внешней ионосферы. М.: ИЗМИРАН, 1980. С. 136–142.
6. Berthelier Y.Y., Lefeuvre F., Mogilevsky M.M., et al. Measurements of the VLF electric field on board the AUREOL 3 spacecraft: TBF-ONCH experiment // Ann. Geophys. 1982. V. 38, N 5. P. 643–667.
7. Ларкина В.И., Лихтер Я.И. Плазмосферные шумовые излучения во время геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэронавигация. 1981. Т. 21, № 4. С. 661–667.
8. Хесс В. Радиационные пояса в магнитосфере Земли. М.: Атомиздат. 1972.
9. Etcheto Y., Gendrin R., Solomon Y., Roux A. Fself - consistent theory of magnetospheric ELF hiss // J. Geophys. Res. 1973. V. 78, N. 34. P. 8150–8196.
10. Kaye S.M., Lin C.S., Park Y.K., et al. The diabatic modulation of equatorial pitch-angle-anisotropy // Geophys. Res. 1978. V. 83, N A6. P. 2675–2682.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Троицк