

- ской бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 г. // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 12—25.
2. Лысенко В. Н. Изменение вертикальной составляющей скорости дрейфа плазмы и кинетических температур в ионосфере // Геомагнетизм и аэрномия.—2001.—41, № 3.—С. 365—368.
3. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
4. Shynnev B. G., Medvedev A. V., Nosov V. E. Ionospheric observation during July 15—16 2000 major geomagnetic storm // Abstracts of 8 joint internat. simp. «Atmospheric and ocean optics. Atmospheric Physics». — Irkutsk, 2001.—Р. 211.

SOME PECULIARITIES OF THE PROCEDURE FOR DETERMINATION OF IONOSPHERIC PLASMA PARAMETERS DURING NATURAL DISTURBANCES IN THE IONOSPHERE

V. N. Lysenko, Yu. V. Cherniak

An anomalous change of the spectrum of signals scattered by the ionospheric plasma was observed with the incoherent scatter radar of the Institute of Ionosphere during the strong geomagnetic storm on 30 May 2003. The change was observed for 1.5 h at heights from 700 to 1200 km. Such phenomenon was detected with the use of Kharkiv incoherent scatter radar for the first time. The results of the observations are presented and a procedure for determination of the disturbed ionosphere is described.

УДК 550.388+520.16+523.31+523.9:520.86

© В. П. Бурмака¹, В. И. Таран¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, Харків

²Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

РАДАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ, СОПУТСТВОВАВШИХ ПОЛЕТАМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Вивчено хвильові збурення, які супроводжували три старту ракет важкого класу з космодрому Байконур. Вплив стартів призводить до зміни характеру хвильових збурень, варіацій їхнього спектрального складу та амплітуд.

ВВЕДЕНИЕ

Эффекты, вызванные стартами ракет (СР) и полетами ракетно-космической техники, изучаются более 40 лет. Как правило, эти эффекты развиваются вдоль траектории полета аппарата. Значительно меньшее число работ посвящено исследованию возможных процессов на большом удалении от траектории. В этом случае проблематичным является само существование эффектов. Здесь с помощью метода некогерентного рассеяния (НР) предпринята попытка частично восполнить пробел в исследованиях волновых возмущений (ВВ) на удалениях около 2 тыс. км от космодромов. Радар НР расположен вблизи г. Харьков (49° 36' с. ш., 36° 18' в. д.) [6]. Основные параметры радара следующие: частота — 158 МГц, диаметр параболической антенны — 100 м, эффективная площадь антенны — около 3700 м², коэффициент усиления антенны — около 10 000, ширина основного лепестка диаграммы направленности на уровне половинной мощности около 1°, импульсная и средняя мощности радиопередающего устройства — до 3.6 МВт и 100 кВт

соответственно.

Для выявления ВВ использовалась методика, описанная нами в работе [3]. В качестве исходных выбирались высотно-временные зависимости НР-мощности $P_s(z, t)$. После удаления тренда $\langle P_s \rangle$, вычисляемого на интервале времени 60 мин, создавались массивы $\delta P_s(z, t) = P_s - \langle P_s \rangle$. Они подвергались дальнейшему анализу. Для относительных амплитуд ВВ справедливо соотношение: $\delta_N = \Delta N / N \approx \delta P_s / \langle P_s \rangle$.

Старт ракеты «Союз» 18 октября 2003 г. Целью наблюдений был поиск ВВ в утреннее время при старте сравнительно мощной ракеты на относительно небольшом удалении от места регистрации. Параметры радара обеспечивали значения отношения сигнал/шум $q = 0.1...5$ в ночное и дневное время соответственно. При этом $\delta_{Nmin} \approx 1...8\%$.

Сведения о ракете. Российская ракета «Союз» относится к тяжелым ракетам. Ее полная масса составляет 305 т, начальная тяга 4.14 МН, высота 46.1 м, низкоорбитальная полезная нагрузка 6855 кг на высоте 200 км. Параметры нулевой ступени

следующие: масса 4×44.4 т, тяга 4×1.02 МН, диаметр 2.7 м, высота 19.6 м, время работы 120 с. Параметры первой ступени: масса 105.4 т, тяга 1 МН, диаметр 3 м, высота 27.8 м, время работы 286 с. Вторая ступень имела массу 25.2 т, тягу 0.3 МН, диаметр 2.7 м, высоту 6.7 м, время работы 300 с.

Старт ракеты с космодрома Байконур осуществлен в 05:38 18 октября 2003 г. Расстояние между местом наблюдения и космодромом равно $R \approx 2050$ км.

Результаты наблюдений. Измерения для диапазона высот 125—1000 км выполнены с 21:00 17 октября до 15:00 18 октября 2003 г. Старт пришелся на утреннее время, отношение q в средней (до 300 км) и внешней ионосфере составляло 3—5 и 0.3—1 соответственно. При этом $\delta_{Nmin} \approx 1...3$ %. Параметры радара приведены в таблице.

Эффекты от утреннего терминатора в этот день были слабыми. К моменту старта их проявления не наблюдались.

Через 3—4 ч после восхода Солнца в ионосфере электронная концентрация заметно возросла на всех высотах. При этом также увеличилась в 5—10 раз абсолютная амплитуда ΔN ВВ (рис. 1). Колебания δP_s и ΔN стали более упорядоченными. На высотах $z \approx 140...180$ км период колебаний составлял 40—45 мин. В то же время на высотах 200—500 км, кроме указанного периода, был хорошо выражен период $T \approx 110$ мин. Продолжительность процесса с $T \approx 110$ мин была около 5 ч. Заметим, что этот процесс стал проявляться через 13—20 мин после старта.

Относительная амплитуда δ_N до старта была 2—4 %, а после него возросла до 3—5 % (рис. 1). Для колебания с $T \approx 110$ мин $\delta_N \approx 10$ %.

Старт ракеты «Протон» 10 декабря 2003 г. Целью этих наблюдений было изучение возможности обнаружения ВВ, вызываемых стартами ракет в ночное время зимой. При этом значения электронной концентрации были достаточно низкими ($N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$), что привело к низким значениям q .

Сведения о ракете. Российская ракета «Протон»

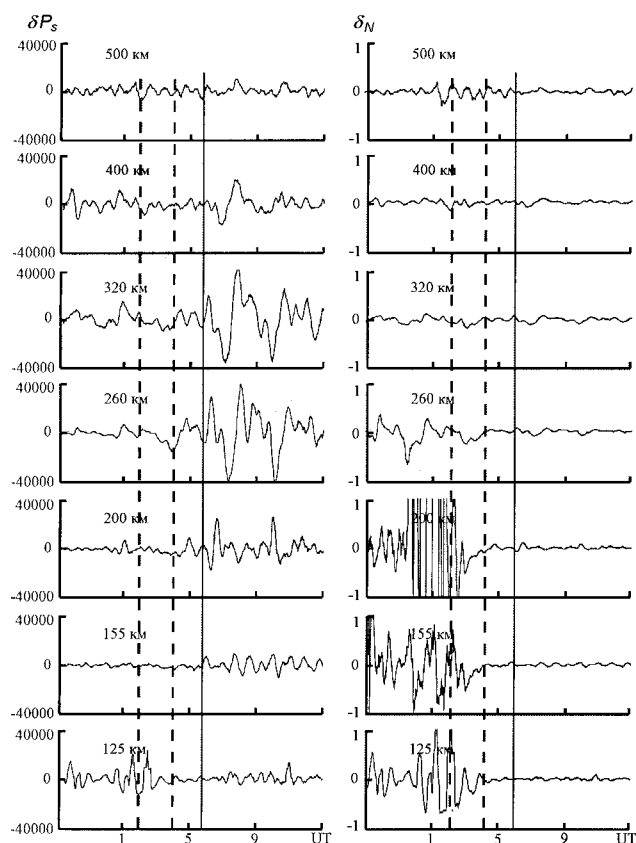


Рис. 1. Временные вариации δP_s амплитуд и относительных амплитуд δ_N ВВ во время старта ракеты «Союз» 18 октября 2003 г. Вертикальными пунктирными линиями показаны моменты восхода Солнца на высоте 450 км и на уровне Земли. Здесь и далее сплошной вертикальной линией указано время старта

относится к тяжелым ракетам. Ее полная масса составляет 711 т, начальная тяга 8.84 МН, высота 59 м, низкоорбитная полезная нагрузка 19.76 т на высоте 200 км. Параметры первой ступени: масса 450.5 т, тяга 10.46 МН, диаметр 4.2 м, высота 21.2 м, время работы 124 с. Параметры второй ступени: масса 167.8 т, тяга 2.4 МН, диаметр 4.2 м, высота 14 м, время работы 206 с. Третья ступень имела массу 50.7 т, тягу 0.63 МН, диаметр 4.2 м, высоту 6.5 м, время работы 238 с; четвертая — массу 17.3 т, тягу 0.085 МН, диаметр 3.7 м, высоту 7.1 м, время работы 600 с.

Результаты наблюдений. Измерения выполнены в диапазоне высот 125—1000 км с 14:00 10 декабря до 6:00 11 декабря 2003 г. Как уже отмечалось, старт имел место в ночное время. Приемлемые значения $q \geq 0.1...0.2$ были лишь в

Основные параметры радара, интервал ΔT_0 предварительной обработки и шаг Δz_0 по высоте

Дата	P_1 , МВт	τ , мкс	Диапазон высот, км	ΔT_0 , мин	Δz_0 , км
18 октября 2003 г.	2.1	135	125—1005	1.0	18
10—11 декабря 2003 г.	2.2	135	125—1005	1.0	18
27—28 декабря 2003 г.	2	780	125—1005	1.0	18

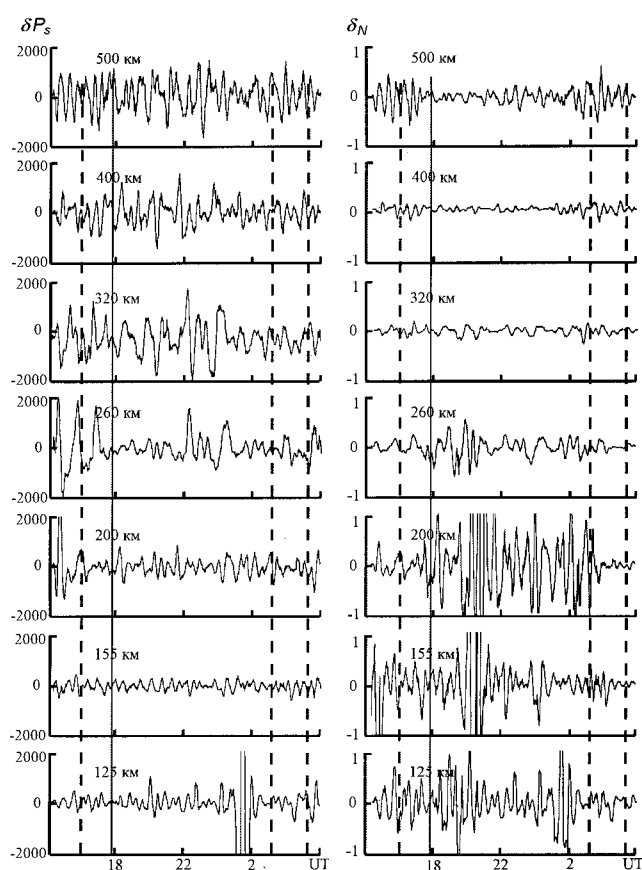


Рис. 2. Временные вариации амплитуд (левая панель) и относительных амплитуд (правая панель) ВВ во время старта ракеты «Протон» 10 декабря 2003 г. Вертикальными пунктирными линиями показаны моменты восхода Солнца на высоте 450 км и на уровне Земли и захода на уровне 450 км

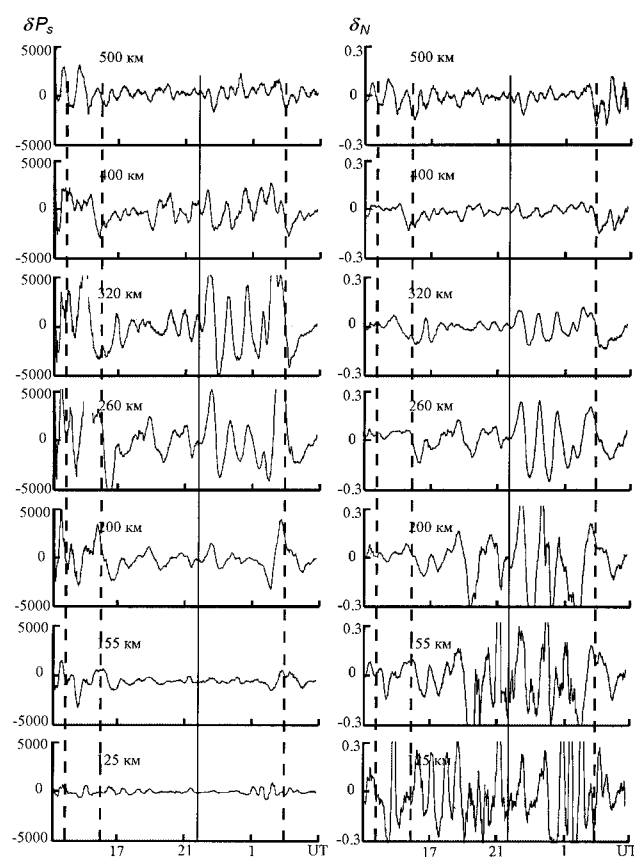


Рис. 3. Временные вариации амплитуд (левая панель) и относительных амплитуд (правая панель) ВВ во время старта ракеты «Союз» 27 декабря 2003 г. Вертикальными пунктирными линиями показаны моменты восхода Солнца на высоте 450 км и захода на высоте 450 км и на уровне Земли

диапазоне высот 290—455 км. Важно, что зимой значение P_s выше, чем в переходное время суток. Особенно четко это проявляется на высотах $z > 350$ км. Такое поведение $P_s(t)$ обусловлено ночными потоками плазмы из плазмосферы.

ВВ в ионосфере наблюдались как до, так и после старта (рис. 2). Абсолютные значения их амплитуды во времени изменялись сравнительно слабо. После старта значения относительной амплитуды на высотах $z \leq 350$ км несколько увеличились. Со стартом ракеты, по-видимому, связаны изменения характера сигнала при $\Delta t_1 = 15...20$ мин и $\Delta t_2 = 60...70$ мин. Лучше всего эти изменения в $\delta P_s(t)$ наблюдались на высотах 308—418 км.

Старт ракеты «Союз» 27 декабря 2003 г. имел место в 21:30 с космодрома Байконур. Целью этих наблюдений было изучение возможности вы-

явления ВВ, вызванных стартом тяжелой ракеты в ночное время вскоре после зимнего солнцестояния. Для обеспечения достаточных значений q использовались импульсы длительностью 780 мкс. При этом в зависимости от высоты и времени наблюдения $q \approx 0.2...10$.

Измерения для диапазона высот 125—1000 км выполнены в интервале времени 15:00 27 декабря — 04:00 28 декабря 2003 г.

Результаты наблюдений. Временные вариации δP_s и ΔN показаны на рис. 3. Из рис. 3 видно, что значительное увеличение амплитуд δP_s имело место на высотах 250—350 км вскоре после старта. Эти изменения продолжались более 5 ч.

Как видно из рис. 3, сначала (примерно до 17 ч) имели место слабые вариации δN , по-видимому, связанные с прохождением вечернего терминатора.

Затем в течение 4—5 ч наблюдались квазипериодические вариации δ_N с относительной амплитудой, не превышающей 10 %. После 22 ч она увеличилась до 30 %. Колебания стали близкими к гармоническим, их период составлял около 65 мин. Колебания продолжались не менее 4 ч. После 2 ч возник аperiodический процесс с $\delta_N \approx 20\%$ и длительностью больше 1 ч. Колебания, наблюдавшиеся после 21:30, скорее всего, связаны со стартом. Их амплитуда существенно зависела от высоты. Первые 50 км амплитуда δ_N увеличивалась с ростом высоты, а затем в диапазоне высот 200—400 км она убывала почти на порядок. Максимальное значение $\delta_N \approx 43\%$ имело место на высоте около 200 км. Эту высоту можно считать высотой расположения атмосферного волновода. Эффективная толщина волновода (по уровню $0.5\delta_{Nmax}$) составляла около 120 км, причем нижняя и верхняя «стенки» волновода располагались на высотах около 140 и 260 км соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Со стартом ракеты «Союз» 18 октября 2003 г. скорее всего связано колебание, имеющее период 110 мин. Оно появилось через 13—20 мин после старта. При $\Delta t_1' = 10...17$ мин и $R' \approx 2100$ км имеем $v' \approx 3.5...2.1$ км/с. Здесь и далее, как и в работе [2], штрихи обозначают скорректированные значения. Более медленные процессы, обусловленные генерацией и распространением ВГВ, в этот день наблюдались с задержкой $\Delta t_2 \approx 50...60$ мин на высотах 400—250 км соответственно (см. рис. 1).

Эффекты от старта ракеты «Протон» 10 декабря 2003 г. существенно маскировались ВВ, которые имели место до старта. Изменения характера сигнала (сбой фазы колебания, изменения его амплитуды и периода) наблюдались через 15—20 и 60—70 мин после старта. Это видно по вариациям δP_s и δ_N на высотах 200—350 км (см. рис. 2). Если эти вариации обусловлены стартом, им соответствуют значения $v' = 2.9...2.1$ км/с и 610...520 м/с. Такие скорости имеют соответственно ММГД- либо магнитоградиентные волны с $\omega \sim 0.001$ с⁻¹ и АГВ в F-области ионосферы [2, 6].

Перед стартом ракеты «Союз» 27 декабря 2003 г. имели место достаточно хаотические вариации δP_s и δ_N , максимальное значение последних обычно не превышало 10 %. Вскоре после старта возникли квазипериодические колебания с периодом $T \approx 65$ мин и относительной амплитудой, достигающей 43 %. По-видимому, они вызваны стартом. Момент

времени прихода ВВ определить сравнительно сложно из-за его наложения на хаотические вариации. Первая положительная полуволна возникла примерно через 16 мин после старта. Скорректированное время распространения ВВ составляло около 13 мин. При скорректированном [2—4] расстоянии от ракеты до места наблюдения $R' \approx 2100$ км ему соответствовала скорость $v' \approx 2.7$ км/с. Такую скорость при $\omega \sim 0.001$ с⁻¹ имеют ММГД- либо магнитоградиентные волны [1, 5].

Что касается ВГВ, то они в этом эксперименте четко не проявлялись. Возможно, эти волны вызвали увеличение амплитуды колебательного процесса на высотах 250—350 км (см. рис. 3), обусловленного приходом магнитных или ММГД волн. При этом время запаздывания возмущений составляло около 50 мин. При $\Delta t_2' \approx 47$ мин имеем $v_2' \approx 740$ м/с. Такая скорость действительно свойственна ВГВ на высотах F-области ионосферы.

ВЫВОДЫ

Полученные значения скоростей распространения ВВ, сопутствовавших стартам, хорошо согласуются с результатами других исследований [2—6, 8—10] и свидетельствуют в пользу того, что нами наблюдались ВВ, вызванные, скорее всего, стартами ракет.

1. Абурджания Г. Д., Хантадзе А. Г. Крупномасштабные электромагнитные волновые структуры в E-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия.—2002.—42, № 2.—С. 245—251.
2. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 2.—С. 143—162.
3. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия.—2004.—9, № 1.—С. 5—28.
4. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия.—1999.—4, № 3.—С. 227—246.
5. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. — М.: Энергоиздат, 1982.
6. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
7. Таран В. И., Подъячий Ю. И., Максимов А. А. Долгопериодные возмущения ионосферы техногенного происхождения // Ионосфера. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. — Харьков: Основа, 1991.— вып. 1.—С. 32—41.

8. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду. Справочное пособие / Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова и А. В. Петрова. — М.: Анкил, 2000.—640 с.
9. Noble S. T. A Large-Amplitude Traveling Ionospheric Disturbance Excited by Space Shuttle During Launch // J. Geophys. Res.—1990.—95.—P. 19037—19044.
10. Pokhotelov O. A. Parrot M., Fedorov E. N., et al. Response of the ionosphere to natural and man-made acoustic sources // Ann. Geophysicae.—1995.—13, N 11.—P. 1197—1210.

RADAR OBSERVATIONS OF WAVE-LIKE DISTURBANCES IN IONOSPHERE, ASSOCIATED WITH SPACE VEHICLE FLIGHTS

V. P. Burmaka, V. I. Taran, L. F. Chernogor

Wave-like disturbances (WLDs) associated with three launches of heavy rockets from the Baikonur cosmodrome are studied. The action of the rocket launches produces some variations in WLD features as well as in their spectral structure and in their amplitudes.

© А. В. Агапитов

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ Ps6 В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ПОСЛЕ МАГНИТНОЙ СУББУРИ

Ps6-пульсации часто идентифицируются как один из проявлений фазы восстановления геомагнитной суббури. На материалах вимірювань КА «Інтербол-1» і системи наземних магнітометричних станцій зроблено оцінку розмірів області низькочастотної активності, швидкості і напрямку переміщення цієї структури у магнітосфері. Показано залежність найінтенсивніших подій від максимуму збурення в D_{st} -індексі. Запропоновано можливий механізм генерації Ps6-хвиль під час вибухової фази суббури з наступним переміщенням хвильового пакету до Землі із магнітосферного хвоста.

В магнитосфере Земли наблюдается широкий спектр возмущений геомагнитного поля. Среди геомагнитных вариаций, амплитуды, фазы и периоды которых изменяются случайным образом, выделяются длиннопериодические колебания P_i и P_c УНЧ-диапазона, также называемые микропульсациями или геомагнитными пульсациями. Амплитуды этих вариаций изменяются от десятых долей нанотесла в умеренных широтах до сотен нанотесла в высоких. P_i — нерегулярные пульсации, кратковременные всплески колебаний с широким нестационарным спектром; P_c — непрерывные пульсации квазисинусоидальной формы и устойчивого режима колебаний. Колебания могут наблюдаться длительное время при почти постоянных амплитуде и периоде. В отдельную группу выделяют Ps6-пульсации с периодами 5—40 мин, появление которых в основном ассоциируется с фазой восстановления магнитосферной суббури. Низкочастотная геомагнитная активность типа Ps6 проявляется в виде волновых пакетов, продолжительностью 30—60 мин. Сигнал проходит на одной частоте, но с довольно быстро изменяющейся амплитудой. Обычно наблюдаются 6—10 периодов.

Наблюдения событий типа Ps6 представлены в основном измерениями наземных станций, расположенными выше 60° геомагнитной широты [5—7]. Пространственная структура активной области для

околоземного пространства была исследована в работе [6] с помощью скоординированных наблюдений КА GEOS-2, станций наземного базирования (расположенных на Скандинавском полуострове) и ионосферных зондов. В хвосте магнитосферы наблюдения низкочастотных геомагнитных пульсаций представлены отдельными проектами. Это, например, ISEE-1, 2 [9, 10], «Geotail» и частично AMPTE. В данной работе представлены наблюдения низкочастотной волновой активности во внешней магнитосфере на основе измерений КА «Интербол-1» (хвостовой) и системы наземных магнитометрических станция CANOPUS в 1995—2000 гг. Наблюдения Ps6 непосредственно в плазменном слое позволяют определить зависимость генерации волнового пакета от фазы суббури.

Классические методы спектрального анализа при анализе сигналов с быстро изменяющимися характеристиками не дают удовлетворительных результатов. Это обуславливает целесообразность применения для анализа специальных методов. Например, в работе [4] для исследования спектральных свойств подобных сигналов используется параметрический метод максимальной энтропии. Разработанная в последние годы методика вейвлет-анализа позволяет проследить изменение не только амплитудных и частотных, но и фазовых характеристик сильно нестационарных сигналов [2]. Преимуществ