

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

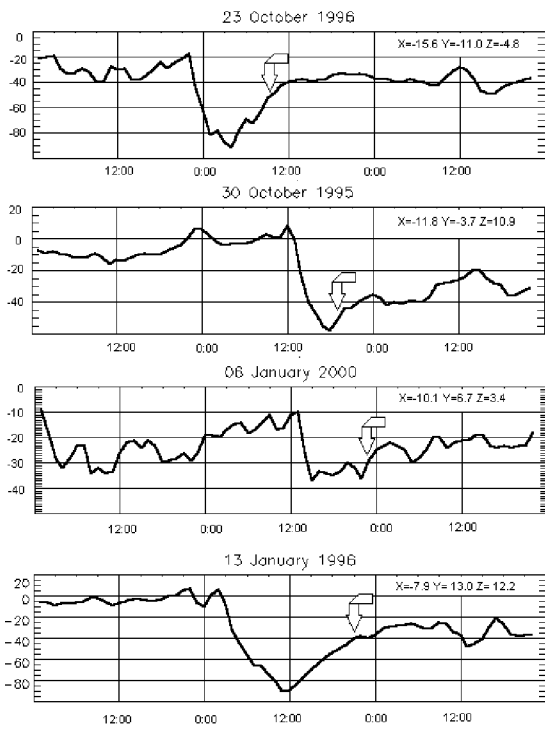


Рис. 1. D_{st} -индекс, демонстрирующий динамику развития магнитосферной суббури для 23.10.1996, 30.10.1995, 08.01.2000, 13.01.1996 гг. Стрелкой показан момент наблюдения Ps6 КА «Интербол-1». Приведены координаты КА «Интербол-1» в системе GSE

ва вейвлет-анализа проявляются при обработке результатов скоординированных наблюдений в различных точках пространства.

Наблюдения Ps6 и зависимость их генерации от геомагнитной активности. КА «Интербол-1» (хвостовой) проводил измерения в 1996—2000 гг., охватывая области плазменного слоя магнитосферы Земли КА с октября по январь. В работе использовались магнитометрические измерения магнитометра MIF-M и плазменного анализатора CORALL, установленных на КА «Интербол-1». Также использовались измерения геомагнитного поля системы наземных магнитометрических станций CANOPUS и значения D_{st} -индекса геомагнитной активности. Магнитометрические данные на начальном этапе обработки были приведены к локальному среднему путем отфильтровывания низкочастотных компонентов.

События типа Ps6 представляют собой монохроматический сигнал, модулированный сильно локализованной огибающей. Ps6-пульсации наблюдаются в основном в фазе восстановления геомагнитной суббури. На рис. 1 показана динамика развития геомагнитных возмущений. Стрелками показаны моменты наблюдения Ps6. Для исследования частотно-временных характеристик подобных сигналов целесообразно использовать непрерывный вейвлет-анализ. Есть широкий выбор вейвлетов с различны-

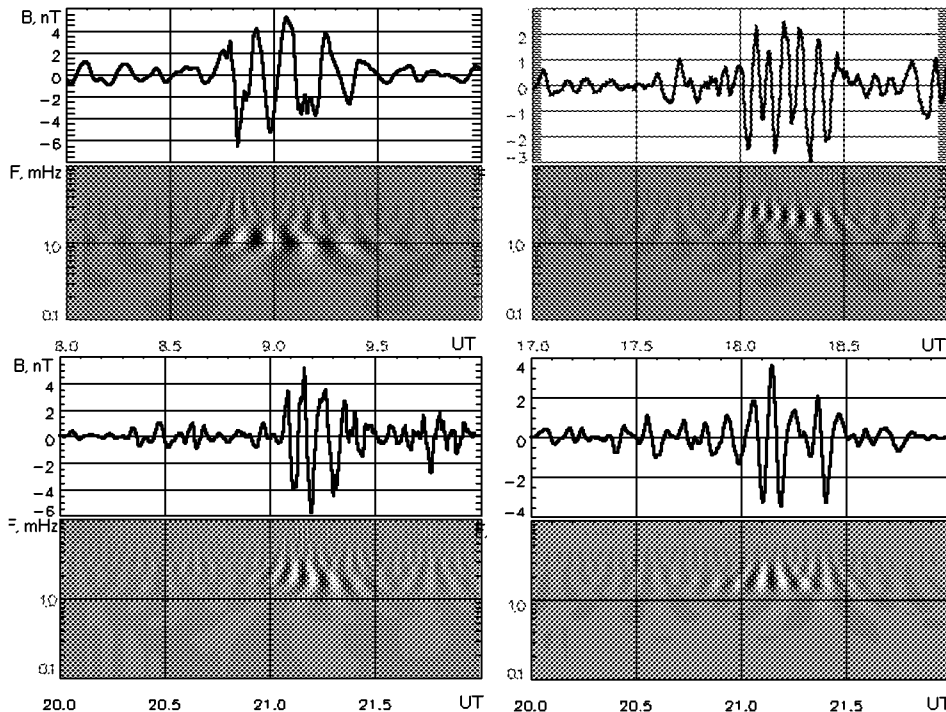


Рис. 2. Возмущения модуля магнитного поля и их вейвлет-образы для волновых событий типа Ps6: а — 20.10.1996 г., б — 30.10.1995 г., в — 08.01.2000 г., з — 13.01.1996 г.

ми характеристиками. Это позволяет подобрать вейвлет, наиболее подходящий для анализа различных сигналов. При исследовании сигналов типа Ps6 вейвлет-спектры с наилучшим контрастом были получены с использованием вейвлета Морле. Это связано с подобием формы сигнала Ps6 и материнского вейвлета.

Магнитные измерения и результаты вейвлет-преобразования четырех событий типа Ps6 приведены на рис. 2. Частота колебаний и длительность регистрации изменяется от 1 мГц и 60 мин для 23.10.1996 г. до 3 мГц и 30 мин для 30.10.1995 г. Колебания давления плазмы и давления магнитного поля проходят в противофазе. Это свидетельствует о наличии в колебаниях магнитозвукового компонента. Возмущения продольного и поперечного компонентов магнитного поля одного порядка. Таким образом, возмущение представляет собой связывание альвеновской и медленной магнитозвуковой волн. За счет противофазы амплитуда колебаний суммарного давления гораздо меньше, чем отдельных компонент. Также в противофазе с колебаниями магнитного поля наблюдаются всплески плотности энергетичных пучков заряженных частиц.

Найти пространственные характеристики волновой структуры можно основываясь на одновременных измерениях в различных точках. Вдоль магнитной силовой линии возмущение распространяется с альвеновской скоростью. Для плазменного слоя альвеновская скорость составляет 600—1000 км/с. Это много больше скорости поперечного смещения пакета. Была выполнена трассировка силовой линии геомагнитного поля из точки наблюдения КА. Для этого была использована модель Цыганенко 1996 г. (в дальнейшем T96) [8]. Координаты условной точки вхождения силовой линии в поверхность Земли $\varphi_N = 60.31^\circ$, $\lambda_E = 268.99^\circ$. Ближайшие к этой точке станции системы CANOPUS FCHU и ESKI (см. рис. 4).

Вейвлет-преобразование сигнала, зафиксированного на станциях, представлено на рис. 3. Видно хорошо локализованное во времени возмущение магнитного поля, которое протекает одновременно с возмущением наблюдаемым на КА. На основе этих данных можно утверждать, что и на Земле, и в плазменном слое наблюдаются проявления одного и того же события. Частотно-временные характеристики сигнала, полученные с помощью вейвлет-анализа, дали возможность исследовать временную динамику развития возмущения на станциях и на КА и точно определить время начала регистрации и максимума возмущения на станциях.

Возмущение, аналогичное зарегистрированному на КА «Интербол-1», наблюдается с разной времен-

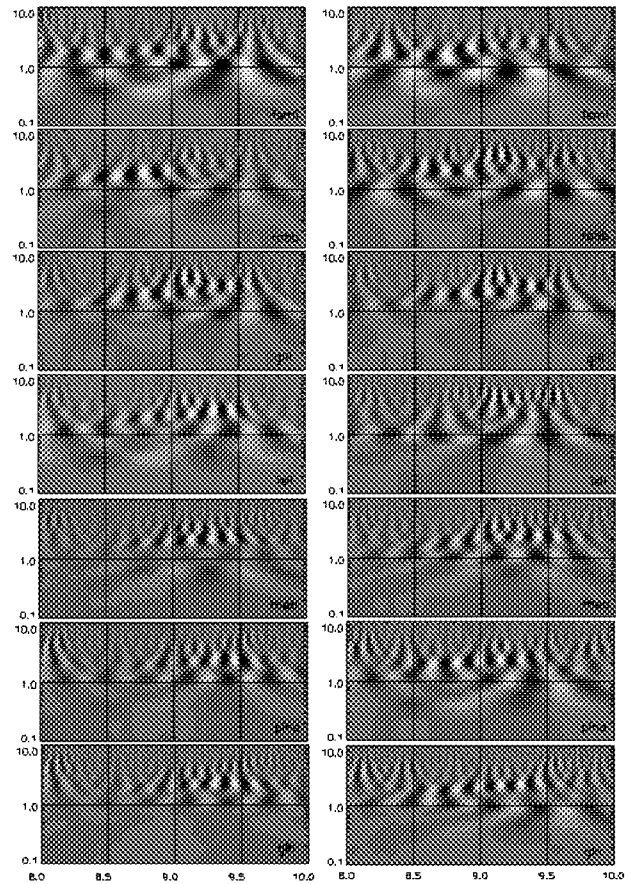


Рис. 3. Вейвлет-спектры X- и Z-компонентов магнитного поля. Измерения 23.10.1996 г. на магнитометрических станциях системы CANOPUS

ной задержкой на станциях FSMI, RABB, GILL, ISLL, PINA системы CANOPUS и станциях GLN и MEA (рис. 3). Эти станции расположены приблизительно вдоль геомагнитной широтной линии. Поперечные колебания магнитного поля происходят синфазно на всех станциях. От станции к станции изменяется со временем только огибающая сигнала. Это говорит о большой длине волны альвеновского компонента возмущения. Фаза продольного компонента изменяется в зависимости от положения станции. По данным наземных станций можно оценить размеры и скорость перемещения области возмущения в плазменном слое. Поперечные размеры порядка $(3...8)R_E$, скорость движения порядка 4—12 км/с. Таким образом, наблюдаемое явление можно объяснить перемещением волнового пакета со стабильной огибающей (солитоноподобная структура) в направлении, почти перпендикулярном к магнитному полю (рис. 5).

Возможность нелинейных солитонов огибающей в

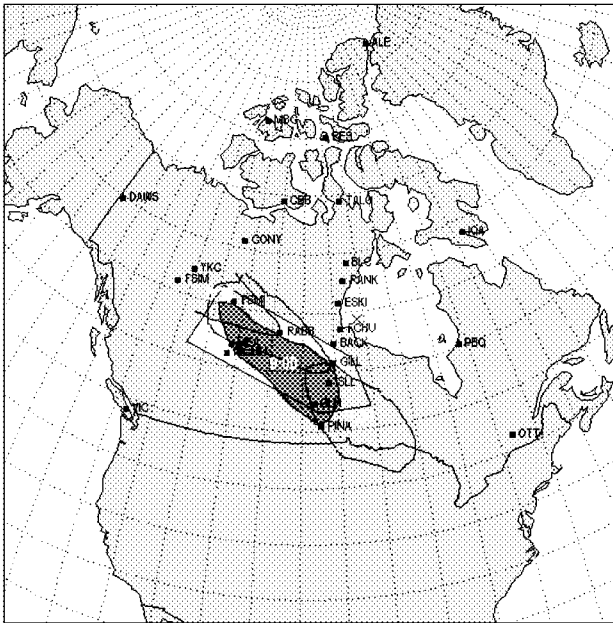


Рис 4. Перемещение активной области по поверхности Земли (по материалам измерений системы CANOPUS и канадских магнитометрических станций). Направление перемещения показано стрелкой. Положения активной области в различные моменты времени различно закрашенными контурами

плазменном слое магнитосферы Земли рассмотрена в работе [3]. Особенность солитона в том, что его амплитуда не является независимым параметром, а определенным образом связана с шириной пакета и частотой заполнения. В рамках модели плоского плазменного слоя параметры волновых пакетов связаны соотношением $b/B \approx \text{const}/(\tau f)$, где b — возмущение магнитного поля, B — фоновое значение магнитного поля, f — частота заполнения, много меньше гирочастоты ионов, τ — длительность сигнала. Для параметров, характерных для плазменного слоя, коэффициент пропорциональности порядка единицы [3].

Все приведенные события типа Ps6 были зафиксированы в фазе восстановления геомагнитной суббури. Механизм генерации Ps6-пульсаций обсуждается в выше цитированных работах, но единого мнения по этому поводу пока нет. Наиболее вероятным механизмом считается неустойчивость Кельвина — Гельмгольца на фоне активных плазменных потоков в фазе восстановления суббури. В работе [7] высказывается предположение о генерации Ps6-возмущений во время взрывной фазы. Пропорциональность задержки наблюдения волнового пакета после максимума возмущения D_{st} -индекса от расстояния от предполагаемой точки мак-

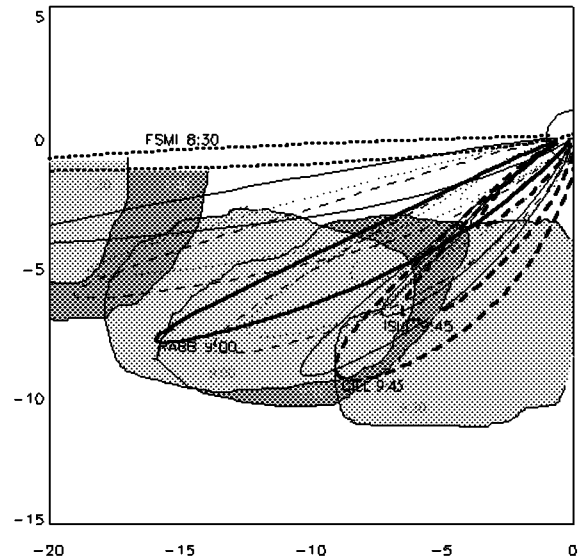


Рис 5. Перемещение активной области в хвосте магнитосферы. Показана проекция активной области на плоскость XY системы GSE. Положение активной области показано различно закрашенными контурами. Показаны также силовые линии магнитного поля Земли в различные моменты времени

симального возмущения геомагнитного поля говорит в пользу этого предположения. События типа Ps6 фиксировались и при отсутствии сильных возмущений геомагнитного поля. Они в основном меньшей амплитуды (амплитуда составляет 5—10 % от фонового значения магнитного поля). Зафиксировано по крайней мере одно яркое событие типа Ps6 при отсутствии геомагнитной активности 02.01.1997 г. В этот и предыдущий дни D_{st} -индекс не опускался ниже -10 и не поднимался выше нуля. Это говорит о возможности альтернативного механизма генерации Ps6-структур.

Выводы. При анализе магнитометрических данных КА «Интербол-1» (хвостовой) за период 1995—2000 гг. были получены основные спектральные и физические особенности низкочастотной волновой активности в хвосте магнитосферы. Возмущение регистрируется в магнитометрических измерениях, измерениях плазменного давления и в потоках заряженных частиц. Амплитуда возмущения изменяется, модуль возмущенного магнитного поля достигает 15—40 % от невозмущенного уровня. Волновой пакет регистрируется в течение 30—90 мин. Ведущая частота колебаний 0.8—2.5 МГц. Колебания динамического давления плазмы и давления магнитного поля проходят в проиофазе. Как показала статистика наблюдений в плазменном слое магнитосферы Земли, именно возмущения такого типа

являются характерными возмущениями УНЧ-диапазона.

Характерные частоты волновых процессов в далеком магнитосферном хвосте меньше, чем во внутренней магнитосфере. Волна заполнения альвеновского типа с магнитозвуковой составляющей. С помощью координированных наблюдений магнитного поля в плазменном слое на борту КА и в магнитосопряженных точках на поверхности Земли с помощью системы магнитометрических станций были сделаны оценки размеров и скорости движения этих структур. Поперечные относительно магнитного поля размеры составляют $(3...6)R_E$. Активная область вытянута вдоль геомагнитной широты. Скорость движения поперек магнитного поля на расстоянии $(15...20)R_E$ в хвосте магнитосферы составляет 6–12 км/с. Скорость, судя по наземным наблюдениям, не является постоянной, а уменьшается при приближении к Земле до 2–4 км/с.

Наблюдения Ps6-возмущений в фазе восстановления геомагнитной суббури, через несколько часов после минимума D_{st} -индекса, возможно, связано только с тем, что наземными магнитометрами регистрируются волновые возмущения, переместившиеся из хвоста магнитосферы [7]. Об этом косвенно свидетельствует время и пространственные координаты точки наблюдения волнового пакета (рис. 1). Время регистрации пропорционально удалению сектора регистрации от точки максимально возмущения геомагнитного поля во время суббури. Так что, возможно, что при протекании взрывной фазы суббури часть энергии сбрасывается в виде волнового пакета типа Ps6, который перемещается к Земле, сохраняя свои характеристики. Параметры частотно-временных характеристик волновой структуры отвечают параметрам, полученным в работе [3] для магнитозвуковых солитонов огибающей в плазменном слое.

The CANOPUS instrument array constructed, maintained and operated by the Canadian Space Agency, provided the data used in this study. CANOPUS Scientist Mission Dr. Eric Donovan, CANOPUS Associate Mission Scientist Dr. Fokke Creutzberg Magnetic Observatory Definitive Data by (C) INTERMAGNET

1. Агапітов А. В., Верхоглядова О. П., Івченко В. М. Хвилі стиснення в магнітосфері Землі: інтерпретація спостережень

спутника «Интербол-1» // Космічна наука і технологія.— 2001.—7, № 5/6.—С. 64—70.

2. Воробьев В. И., Грибунин В. Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. — СПб, 1999.—180 с.
3. Гульельми А. В., Репин В. Н. МГД-солитоны в хвосте магнитосферы // Геомагнетизм и аэрономия.—1978.—18, № 6.—С. 1089—1092.
4. Иванов В. В., Ротанова Н. М. Исследование структуры геомагнитных пульсаций типа Ps6 спектральными методами // Геомагнетизм и аэрономия.—1991.—31.—С. 625—629.
5. Connors M., Rostoker G., et al. Ps disturbances: relation to substorms and the auroral oval // *Annal. Geophysicae*.—2003.—P. 493—508.
6. Khrushchinsky A. A., Gustafsson, et al. The SAMBO-GEOS experiment: A Ps-6 event from ground-satellite observations // *ESA Achievements of the Intern. Magnetospheric Study (IMS)* —P. 625—627.
7. Steen A., Collis B. T., et al. Observations of a gradual transition between Ps6-activity with auroral torches and surgelike pulsations during strong geomagnetic disturbances // *J. Geophys. Res.*—1988.—93.—P. 8713—8733.
8. Tsyganenko N. A. Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause // *J. Geophys. Res.*—1995.—100A, N 4.—P. 5599—5612.
9. Zhu X., Kivelson M. Compressional ULF Waves in the Outer Magnetosphere. 1. Statistical Study // *J. Geophys. Res.*—1994.—99A, N 1.
10. Zhu X., Kivelson M. Compressional ULF Waves. 2. Case Study // *J. Geophys. Res.*—1994.—99A, N 1.—P. 241—252.

Ps6 PROPAGATION IN THE EARTH MAGNETOSPHERE TAIL AFTER MAGNETIC SUBSTORMS

A. V. Agapitov

The ULF geomagnetic pulsations in the Earth magnetosphere tail display themselves as localized in time wave packets, with fill frequency in the range of Ps5 or Ps6. Therefore, it is expedient to apply wavelet analysis to these phenomena research. Wavelet-spectra of magnetometric and plasma measurements made by Interball-1 (tail) satellite demonstrate presence of magnetosonic component: oscillations of plasma pressure and magnetic field pressure are in phase opposition. Wave frequency is less than frequency of same events in the inner magnetosphere (so called field line resonance). Ps6 high-amplitude waves in outer magnetosphere have direct relation to substorm evolution. Wave amplitude depends on geomagnetic activity and magnetosphere region confirmed it. These structures are also observed by Earth-based magnetometer systems. CANOPUS magnetometers system data are used. Due to multipoint observations, it is possible to obtain spatial and temporary event parameters. Transversal to magnetic field size of wave packet is about $(1-3)R_E$. It moves transverse to magnetic field with a speed of about 2–6 km/s.