

УДК 551.510.537

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СЕВЕРНО-ЮЖНУЮ АСИММЕТРИЮ УНЧ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В ПОЛЯРНЫХ ШАПКАХ

© 2019 г. А.В. Гульельми¹, А.С. Потапов², Б.В. Довбня³

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

³ Геофизическая обсерватория “Борок” ИФЗ РАН, Ярославская обл., пос. Борок, Россия

Поставлен вопрос о влиянии ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) на северно-южную асимметрию вероятности появления ультранизкочастотных (УНЧ) дискретных волновых пакетов $Pi1$ в полярных шапках. Длительность рассматриваемых сигналов составляет от нескольких единиц до десятков минут; частота лежит в диапазоне от десятых долей герца до нескольких герц, снижаясь от переднего фронта сигнала к заднему. В зависимости от ориентации вектора ММП в вертикальной плоскости область так называемого форшока (области перед околоземным ударным фронтом, в которой силовые линии ММП пронизывают фронт) располагается к югу или к северу от плоскости геомагнитного экватора. На основе анализа данных антарктической обсерватории “Восток” показано, что в южной полярной шапке вероятность наблюдения $Pi1$ примерно в два раза выше при южной ориентации форшока, чем при северной. Результат свидетельствует, что, по крайней мере, заметная часть волновых пакетов $Pi1$ проникает в магнитосферу из межпланетной среды.

Ключевые слова: дискретные ультранизкочастотные сигналы, северно-южная асимметрия, межпланетное магнитное поле, форшок, магнитосфера.

Введение

Волновая активность магнитосферы в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне характеризуется тонкой реакцией на величину и ориентацию межпланетного магнитного поля (ММП) [Гульельми, Потапов, Довбня, 2015; Гульельми и др., 2017]. Давно и хорошо известна зависимость частоты дневных перманентных колебаний $Pc3$ от величины ММП [Гульельми, Троицкая, 1973; Потапов, 1974]. При этом амплитуда названных колебаний довольно специфическим образом зависит от ориентации ММП – наблюдается так называемый эффект Троицкой–Большаковой (подробнее об этом явлении см. в [Potapov, Polyushkina, Guglielmi, 2017]). В дополнение к сказанному следует отметить, что от ориентации ММП зависит частота колебаний $Pc1-2$ типа *SE* (*Serpentine Emission*) в полярных шапках [Guglielmi, Potapov, Dovbnya, 2015].

Известны и другие примеры, свидетельствующие о контролирующей роли ММП в формировании режима УНЧ колебаний [Guglielmi, Pokhotelov, 1996]. Так, амплитуда колебаний $Pc3$ обычно максимальна в предполуденные часы, т.е. распределение амплитуды по земной поверхности в среднем характеризуется асимметрией относительно плоскости полуденного меридиана [Гульельми, Троицкая, 1973]. Это свойство целиком определяется спиральной структурой ММП [Паркер, 1965], которая, в свою очередь, определяется вращением Солнца.

В данной статье излагаются результаты исследования асимметрии УНЧ колебаний относительно другой плоскости, а именно – относительно плоскости геомагнитного экватора.

Речь пойдет о различии условий возбуждения колебаний в северной и южной полусферах магнитосферы в зависимости от ориентации ММП. В качестве объекта исследования были выбраны волновые пакеты типа *DS* (*Discrete Signals*), которые спорадически появляются в полярных шапках. По классификации УНЧ колебаний, предложенной В.А. Троицкой, колебания такого типа следует отнести к виду *Pi1* [Троицкая, 1964].

Уместно вспомнить, что в период Международного геофизического года (1957–1958) была осуществлена запись УНЧ колебаний в пунктах, расположенных в различных регионах планеты, включая обе полярные шапки [Троицкая, 1961], что стало возможным в первую очередь благодаря незаурядному организаторскому таланту профессора В.А. Троицкой, руководившей этими работами.

Настоящая статья построена следующим образом. Сначала авторы представляют метод исследования, который ранее использовался при изучении волновых пакетов *Pi1*, но на довольно ограниченном материале наблюдения [Гульельми, 1979]. Затем описывается база данных, существенно расширенная по сравнению с ранее проведенными исследованиями, и, что самое главное, выполнено тестирование статистической достоверности нашей гипотезы о влиянии ориентации ММП относительно плоскости геомагнитного экватора на северно-южную асимметрию *DS*. После этого кратко обсуждается явление северно-южной асимметрии в отношении двух других видов УНЧ колебаний – *Pc1* и *Pi3*. Завершается статья кратким резюме.

Постановка задачи и метод исследования

Сечения магнитосферы плоскостью полуденного меридиана при двух различных ориентациях ММП схематически представлены на рис. 1.

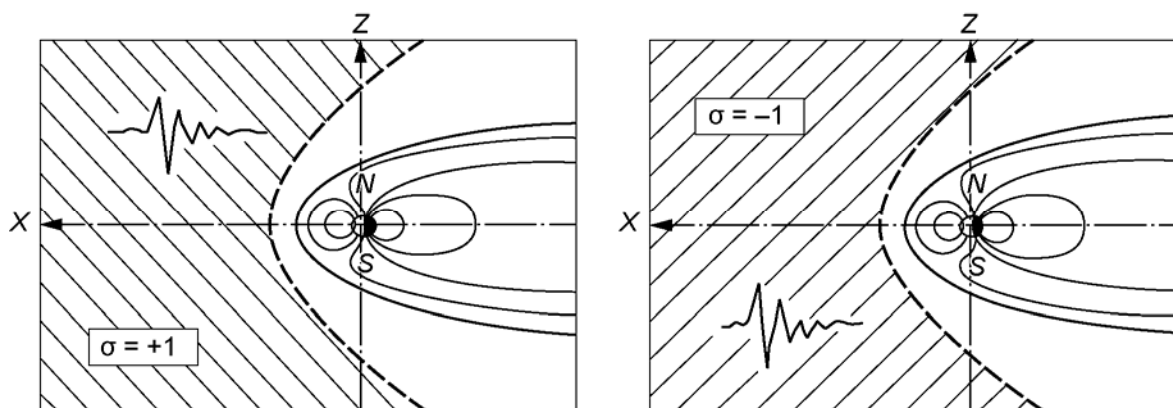


Рис. 1. Меридиональные сечения магнитосферы при разных значениях дихотомической переменной σ : слева – $\sigma=+1$, справа – $\sigma=-1$ [Гульельми, Потанов, 2017а]. Штриховая линия – фронт околоземной ударной волны; сплошные прямые линии – проекции на плоскость силовых линий ММП

Fig. 1. Meridional sections of the magnetosphere at different values of the dichotomous variable σ . Left-hand panel: $\sigma=+1$; Right-hand panel: $\sigma=-1$ [Guglielmi, Potapov, 2017a]. The dashed line is the Earth's bow shock front; solid straight lines are the interplanetary field line projections onto the meridional plane

Фронт околоземной ударной волны изображен на рисунке штриховой линией. Перед фронтом располагается так называемая область форшока, внешней границей

которой служит силовая линия ММП, касающаяся фронта. Силовые линии ММП, а точнее, их проекции на плоскость, показаны сплошными прямыми линиями.

Можно видеть, что при разных значениях дихотомической переменной $\sigma = \text{sign}(B_x B_z)$, где B_x и B_z – компоненты ММП, силовые линии ММП расположены по-разному: при $\sigma = -1$ (см. рис. 1, *справа*) они “скошены” к югу, при $\sigma = +1$ (см. рис. 1, *слева*) – к северу. В соответствии с этим положение форшока относительно плоскости экватора качественно меняется при изменении знака σ .

Известно, что характерной особенностью форшока является наличие в нем высокой интенсивности электромагнитных волн в широком диапазоне частот. На рис. 1 мы изобразили это весьма схематично, поместив в поле, изображающее форшок, стилизованное изображение иррегулярной волны. Еще в семидесятые годы прошлого столетия было показано, что из области форшока в магнитосферу проникают волны $Pc3$, внося свой вклад в спектр УНЧ колебаний, наблюдаемых на земной поверхности [Гульельми, Троицкая, 1973; Потанов, 1974]. Область форшока, однако, характеризуется не только перманентным существованием колебаний $Pc3$ – в ней спорадически возбуждаются мощные дискретные импульсы и присутствует нестационарный фон электромагнитных флуктуаций в диапазоне от миллигерц до нескольких килогерц [Russell, Hoppe, 1983].

Чисто геометрические соображения подсказывают, что электромагнитные волны могут легче проникать в южную полусферу магнитосферы при $\sigma = -1$ и в северную при $\sigma = +1$. Это определило процедуру проверки нашей гипотезы о связи возбуждения DS с ориентацией ММП, предполагающую необходимость экспериментальной оценки возможности существования северно-южной асимметрии возбуждения DS , зависящей от знака параметра σ .

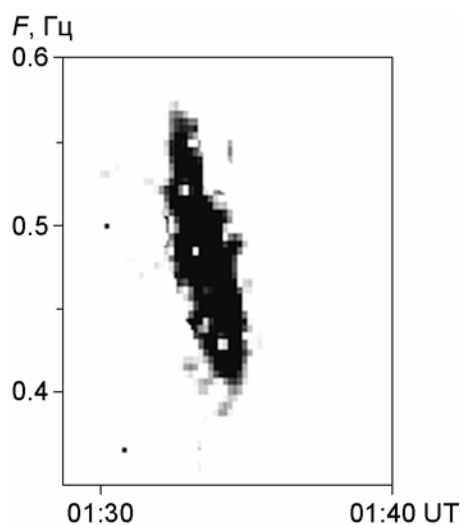
Исходные данные и результат анализа

В качестве исходного материала были использованы данные регистрации УНЧ колебаний в обсерватории “Восток”, расположенной в Антарктиде. Первичная обработка данных состояла в селекции волновых пакетов DS и построении их динамических спектров. Типичный пример DS падающего тона показан на рис. 2.

Мы ограничимся тщательным анализом DS только падающего тона, используя записи сделанные, в обсерватории “Восток”; о второй разновидности DS , т.е. о волновых

Рис. 2. Динамический спектр волнового пакета типа DS , зарегистрированного в обсерватории “Восток” 09.07.1970 г. Внизу на горизонтальной оси – время UT. Интенсивность заливки пропорциональна амплитуде сигнала

Fig. 2. The dynamic spectrum of a wave packet of the DS type, recorded at the Vostok Observatory on July 9, 1970. UT time is shown on the bottom X-axis. The intensity of the filling is proportional to the amplitude of the signal



пакетах растущего тона, будет сказано несколько слов ниже, при обсуждении явления северно-южной асимметрии в отношении двух других видов УНЧ колебаний¹. В том же разделе мы обсудим данные об асимметрии DS по записям в обсерватории “Туле”, расположенной в Арктике.

Заметим, что в литературе часто употребляется обозначение R -сигнал для пакетов падающего тона и L -сигнал для пакетов растущего. При этом имеется в виду частотная дисперсия волн правой (*Right mode*) и левой (*Left mode*) поляризации в неподвижной плазме. Мы для краткости также будем использовать эти обозначения, не вкладывая в них, однако, определенного физического смысла, поскольку непростой вопрос о модовой структуре DS нами не исследовался.

Были проанализированы записи, выполненные в обсерватории “Восток” в ноябре–декабре 1966 г., марте–декабре 1968 г. и в течение всего 1969 г., что составляет в сумме 17568 ч наблюдений. За вычетом часов, в течение которых по данным базы данных *OMNI* измерения ММП отсутствовали, а также часов, когда модуль угла $\theta = \arctg(B_z/B_x)$ был либо более 75° , либо менее 15° , в нашем распоряжении осталось 9035 ч наблюдений УНЧ колебаний, обеспеченных данными ММП. Из них дискретные R -сигналы наблюдались в 69 часовых интервалах. Другими словами, вероятность появления DS разновидности R невелика, составляя $p = 7.6 \cdot 10^{-3}$. Среднеквадратическая ошибка в оценке вероятности с учетом объема выборки – $s = 9 \cdot 10^{-4}$.

Напомним, что мы условились отмечать события с помощью дихотомической переменной $\sigma = +1$, если $B_x B_z > 0$, и $\sigma = -1$, если $B_x B_z < 0$. За указанный период наблюдений было 4408 ч с $\sigma = +1$ и 4627 ч с $\sigma = -1$. Оказалось, что суммарное время наблюдения волновых пакетов DS падающего тона составило 48 ч при $\sigma = -1$ и 21 ч при $\sigma = +1$. Иными словами, вероятности появления DS равны $p^- = 1.04 \cdot 10^{-2}$ при $\sigma = -1$ и $p^+ = 4.7 \cdot 10^{-3}$ при $\sigma = +1$, причем среднеквадратическая ошибка в оценке вероятности с учетом объема выборки соответственно – $s^- = 1.5 \cdot 10^{-3}$ и $s^+ = 10^{-3}$.

Итак, мы обнаружили, что p^- превышает p^+ более чем в два раза. Другими словами, в южной полярной шапке DS появляются чаще при южной ориентации форшока, чем при северной (см. рис. 1). Статистическая достоверность наших выводов велика, так как заведомо выполняется известное правило “трех сигма” [Боровиков, 2003]. В самом деле, разность $p^- - p^+ = 5.7 \cdot 10^{-3}$ превышает как $3s^-$, так и $3s^+$. Вероятность того, что рассматриваемая нами асимметрия отсутствует, практически равна нулю.

Северно-южную асимметрию появления DS в южной полярной шапке наглядно демонстрирует рис. 3, где серыми столбцами показана гистограмма распределения по значениям $B_x B_z$ полного набора часов наблюдений ММП на обсерватории “Восток”, темно-серыми – гистограмма распределения часов, в которые наблюдались R -сигналы. Гладкие линии показывают аппроксимации распределений кривыми Гаусса, соответствующими нормальному распределению.

На рисунке отчетливо видно смещение второго распределения относительно первого. Средние распределений Гаусса составляют $B_x B_z = -0.11$ для общего числа наблюдений и $B_x B_z = -2.59$ для часов с появлением R -сигналов.

Мы имели возможность сопоставить использованные в данной работе записи, сделанные в Антарктиде, с записями, полученными на арктической обсерватории “Туле” в Гренландии. Обработка данных обсерватории “Туле” была выполнена одним из авторов² данной статьи совместно с аспирантом ИФЗ РАН И.П. Лавровым.

¹ Подробнее о морфологии DS см. в монографии [Гульельми, 1979].

² Б.В. Довбня, старший научный сотрудник Геофизической обсерватории “Борок”.

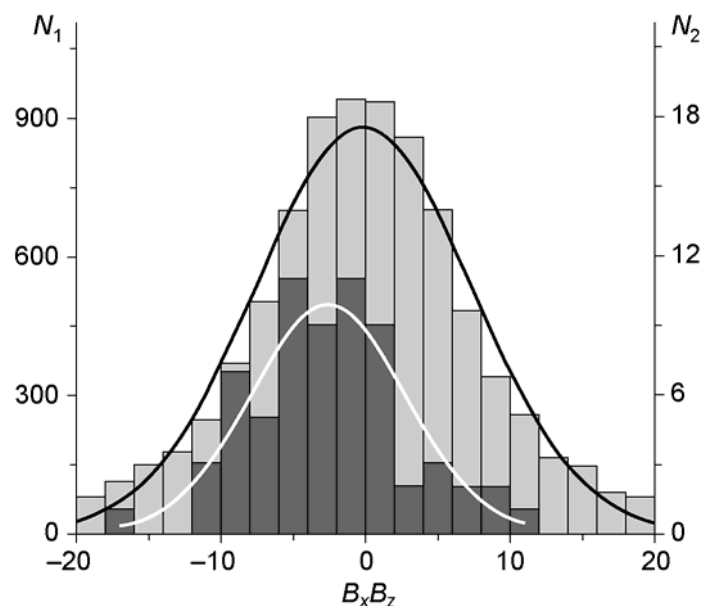


Рис. 3. Распределение по величине управляющего параметра $B_x B_z$ часов наблюдения УНЧ колебаний на обсерватории “Восток” (серый цвет, шкала N_1) и часов появления волновых пакетов DS разновидности R (темно-серый, шкала N_2). Гладкие черная и белая кривые – гауссовы аппроксимации соответствующих распределений. Наблюдения 1966–1969 гг.

Fig. 3. The gray bars show the number of hours with general ULF observations at the Vostok Observatory, depending on the control parameter $B_x B_z$. The dark gray bars indicate the number of hours when R -type DS wave packets occurred. Smooth black and white curves are Gaussian approximations of the corresponding distributions. Observations from 1966–1969

Благодаря проведенному сопоставлению результат, полученный по данным обсерватории “Восток”, был качественно подтвержден. Количество DS падающего тона в обсерватории “Туле” при $\sigma=+1$ примерно в полтора раза больше, чем при $\sigma=-1$, а именно, 20 против 14, что соответствует картине, показанной на рис. 1. Однако объем записей в обсерватории “Туле” (было рассмотрено 34 события) недостаточно велик для применения простых критериев типа “правило трех сигма”. Исследование этих записей будет продолжено с применением более тонких методов анализа.

Обсуждение

Полученные результаты позволяют сделать два вывода. Во-первых, северно-южная асимметрия DS существует и подтверждает ключевую роль ММП в формировании режима УНЧ колебаний, поскольку расположение форшока относительно плоскости геомагнитного экватора полностью определяется ориентацией силовых линий ММП. Во-вторых, по крайней мере, заметная часть волновых пакетов DS разновидности R проникает в магнитосферу из области форшока.

Мы проанализировали DS разновидности R , т.е. сигналы падающего тона. Относительно второй разновидности – L -сигналов – необходимо сказать, что и в южной, и в северной полярных шапках они появляются значительно реже. Соответственно, объем материала для их обработки сравнительно невелик. Ни в Арктике, ни в Антарктиде нам не удалось обнаружить контролирующего влияния ориентации форшока относительно плоскости геомагнитного экватора на DS сигналы растущего тона, и причина вероятного отсутствия связи L -сигналов с ММП нам пока что не ясна.

Методика исследования, аналогичная той, что использована в данной работе, была с успехом применена при изучении северно-южной асимметрии колебаний $Pc1$ типа IAR в ионосферном резонаторе Альвена–Беляева по данным наблюдения на среднеширотной обсерватории Монды. Результат описан в недавно опубликованной работе [Гульельми, Потапов, 2017а], где обнаружена зависимость суточной активности УНЧ колебаний в ионосферном резонаторе от ориентации ММП перед фронтом магнитосферы.

Еще один успешный пример использования указанной методики представлен в работе [Гульельми и др., 2017]. Были исследованы мощные колебания $Pi3$ типа $IPCL$ по данным обсерватории “Мирный” (Антарктида). Напомним, что эти колебания чаще всего возникают в околополуденном секторе овала сияний. Чтобы проанализировать $IPCL$ на предмет проверки нашей гипотезы об активизации при $\sigma=-1$, т.е. при благоприятной ориентации форшока, Б.И. Клайн использовал архивные записи, сделанные в обсерватории “Мирный”, которые хранятся в обсерватории “Борок” ИФЗ РАН, а также базу данных МЦД (<http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html>). Результат анализа амплитудного распределения $IPCL$ безусловно подтвердил гипотезу – активность $IPCL$ в обл. “Мирный” при $\sigma=-1$ выше, чем при $\sigma=+1$. Различие достоверно на уровне 0.95 по критерию Фишера (подробнее см. в [Гульельми и др., 2017]). Данный результат проливает новый свет на возможный механизм возбуждения $IPCL$. Эта сторона вопроса будет рассмотрена в последующих публикациях.

Заключение

Подведем итог нашего исследования. Мы проанализировали записи УНЧ электромагнитных колебаний в антарктической обсерватории “Восток” и показали, что в южной полярной шапке вероятность наблюдения волновых пакетов $Pi1$ примерно в два раза выше при южном расположении форшока, чем при северном. Тем самым мы показали, во-первых, роль ММП в пространственном распределении УНЧ колебаний данного вида, поскольку расположение форшока относительно плоскости геомагнитного экватора полностью определяется ориентацией силовых линий ММП. Во-вторых, наш результат косвенно свидетельствует, что, по крайней мере, заметная часть волновых пакетов $Pi1$ проникает в магнитосферу из межпланетной среды.

Таким образом, данная работа в определенном отношении завершает намеченный нами цикл исследований по изучению влияния ММП на северно-южную асимметрию УНЧ колебаний магнитосферы [Гульельми, Потапов, Довбня, 2015]. Асимметрия обнаружена в отношении колебаний $Pc1$ типа IAR на средних широтах [Гульельми, Потапов, 2017а], колебаний $Pi3$ типа $IPCL$ в дневном секторе овала сияний [Гульельми и др., 2017], и, наконец, колебаний $Pi1$ типа DS в полярных шапках (данная публикация).

Благодарности

Авторы искренне благодарят своих коллег О.Д. Зотова, Б.И. Клайна, И.П. Лаврова и В.Ф. Рубана за обсуждения в ходе подготовки статьи и за их помощь в исследовании УНЧ волновых полей в рамках совместного проекта.

Представленную статью, как и свои более ранние публикации (см. [Гульельми, Потапов, 2017б; Гульельми и др., 2017]), мы, ученики и сотрудники профессора Валерии Алексеевны Троицкой, посвящаем ее памяти.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы № 28 Президиума РАН, проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 16-05-00056 и 16-05-00631, а также программ государственных заданий ИФЗ РАН (№ 0144-2014-00116) и ИСЗФ СО РАН (ФНИ П.16).

Литература

- Боровиков В.* STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
- Гульельми А.В.* МГД волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979. 139 с.
- Гульельми А.В., Потапов А.С.* Влияние межпланетного магнитного поля на УНЧ колебания ионосферного резонатора // Космические исследования. 2017а. Т. 55, № 4. С.263–267.
- Гульельми А.В., Потапов А.С.* Волны от Солнца: К столетию со дня рождения В.А. Троицкой // Солнечно-земная физика. 2017б. Т. 3, № 3. С.85–99.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А.* Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
- Гульельми А.В., Потапов А.С., Довбня Б.В.* Ключевая роль межпланетного магнитного поля в формировании режима колебаний магнитосферы Земли // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16–19 июня 2015 г.): Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2015. С.328–334.
- Гульельми А.В., Потапов А.С., Довбня Б.В., Клайн Б.И., Зотов О.Д., Стерликова И.В., Рубан В.Ф., Лавров И.П.* Триггерные эффекты в магнитосфере: К столетию В.А. Троицкой // IV Всероссийская конференция с международным участием “Триггерные эффекты в геосистемах”. 6–9 июня 2017 г.: Тезисы докладов. М.: ИДГ РАН, 2017. С.28–29.
- Паркер Е.* Динамические процессы в межпланетной среде. М.: Мир, 1965. 302 с.
- Потапов А.С.* Возбуждение геомагнитных пульсаций типа Pc3 перед фронтом околоземной ударной волны пучком отраженных протонов // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1974. Вып. 34. С.3–12.
- Троицкая В.А.* Классификация быстрых вариаций магнитного поля и земных токов // Геомагнетизм и аэронаука. 1964. Т. 4, № 3. С.615–616.
- Guglielmi A.V., Pokhotelov O.A.* Geoelectromagnetic waves. Bristol and Philadelphia: IOP Publ. Ltd., 1996. 402 p.
- Guglielmi A., Potapov A., Dovbnya B.* 5-minute solar oscillations and ion cyclotron waves in the solar wind // Solar Phys. 2015. V. 290, N 10. P.3023–3032. DOI: 10.1007/s11207-015-0772-2.
- Potapov A.S., Polyushkina T.N., Guglielmi A.V.* Troitskaya–Bolshakova effect as a manifestation of the solar wind wave turbulence // Planetary Space Sci. 2017.
- Russell C.T., Hoppe M.M.* Upstream waves and particles // Space Sci. Rev. 1983. V. 34, N 2. P.155–172.
- Troitskaya V.A.* Pulsations of the Earth's electromagnetic field with periods of 1 to 15 seconds and their connection with phenomena in the high atmosphere // J. Geophys. Res. 1961. V. 66, N 1. P.5–18.

Сведения об авторах

ГУЛЬЕЛЬМИ Анатолий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(495) 582-99-71. E-mail: guglielmi@mail.ru

ПОТАПОВ Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики СО РАН. 664033, Иркутск-33, ул. Лермонтова, д. 126А. Тел.: +7(395) 251-16-73. E-mail: potapov@iszf.irk.ru

ДОВБНЯ Борис Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Геофизическая обсерватория “Борок” Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 152742, пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский район. Тел.: +7(485) 47-24-763. E-mail: dovbnya@inbox.ru

INFLUENCE OF THE INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD ORIENTATION ON NORTH-SOUTHERN ASYMMETRY OF ULF WAVE PACKETS IN THE POLAR CAPS

A.V. Guglielmi¹, A.S. Potapov², B.V. Dovbnya³

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,*

³ *Borok Geophysical Observatory of Institute of Physics of the Earth RAS, Borok, Yaroslavl region, Russia*

Abstract. The question is raised about the effect of the orientation of the interplanetary magnetic field (IMF) on the north-southern asymmetry of the occurrence of the Pi1 ultra low frequency (ULF) wave packets in polar caps. The duration of the signals under consideration ranges from several units to tens of minutes, and the frequency lies in the range from tenths of a hertz to several hertz, falling from the leading edge of the signal to the back one. Depending on the IMF vector orientation in the vertical plane, the area of the so-called foreshock is located to the south, or to the north of the geomagnetic equator plane. By analyzing the data of the Antarctic observatory Vostok, it is shown that in the southern polar cap the probability of Pi1 observing is approximately twice higher with the southern orientation of the foreshock than with the northern one. The result indicates that at least an appreciable part of the Pi1 wave packets penetrates into the magnetosphere from the interplanetary medium.

Keywords: discrete ultra low frequency signals, north-southern asymmetry, interplanetary magnetic field, foreshock, magnetosphere.

References

- Borovikov V., *STATISTICA. Iskusstvo analiza dannykh na kompyutere: Dlya professionalov* (The art of data analysis on a computer: For professionals), Saint-Petersburg: Piter, 2003, 688 p. (in Russian).
- Guglielmi A.V., *MGD-volny v okolozemnoi plazme* (MHD Waves in the Near-Earth Plasma). Moscow: Nauka, 1979, 139 p. (in Russian).
- Guglielmi A.V., Pokhotelov O.A. *Geoelectromagnetic waves*. Bristol and Philadelphia: IOP Publ. Ltd., 1996. 402 p.
- Guglielmi A.V., Potapov A.S., Influence of the interplanetary magnetic field on ULF oscillations of the ionospheric resonator, *Cosmic Research*, 2017a, vol. 55, no. 4, pp. 248-252.
- Guglielmi A.V., Potapov A.S., Waves from the Sun: To the 100th anniversary of V.A. Troitskaya's birth. *Solar-Terrestrial Physics*, 2017b, vol. 3, no. 3, pp. 97-100.
- Guglielmi A.V., Troitskaya V.A., *Geomagnitnye pulsatsii i diagnostika magnitosfery* (Geomagnetic Pulsations and Diagnostics of the Magnetosphere). Moscow: Nauka, 1973, 208 p. (in Russian).
- Guglielmi A., Potapov A., Dovbnya B., 5-minute solar oscillations and ion cyclotron waves in the solar wind, *Solar Phys.*, 2015, vol. 290, no. 10, pp. 3023-3032.
- Guglielmi A.V., Potapov A.S., Dovbnya B.V., The key role of the interplanetary magnetic field in the formation of the oscillation regime of the earth's magnetosphere, in *Triggernyye effecty v geosistemah (Moskva, 16–19 iyunya 2015): Materialy tretyego Vserossijskogo srminara-soveschaniya* (Trigger effects in the geosystems. Moscow, 16–19 June 2015. Materials of the Third All-Russian Workshop-Meeting). Moscow: GEOS, 2015, pp. 328–334. (in Russian).
- Guglielmi A.V., Potapov A.S., Dovbnya B.V., Klain B.I., Zotov O.D., Sterlikova I.V., Ruban V.F., Lavrov I.P., Trigger effects in the magnetosphere: By the centenary of VA. Troitskaya, in *Triggernyye effecty v geosistemah. IV Vserossijskaya konferentsiya. Moskva, 6–9 iyunya 2017* (Trigger effects in geosystems. IVth All-Russian Conference. Moscow, June 6-9, 2017). Abstracts of reports. Moscow: IDG RAS, 2017, pp. 28-29 (in Russian).
- Parker E.N., *Interplanetary Dynamical Processes*, New York: Interscience Publishers, 1963.
- Potapov A.S., Excitation of Pc3 geomagnetic pulsations in front of the Earth's bow shock by a reflected protons beam. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* (Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics), 1974, no. 34, pp. 3-12. (in Russian).

- Potapov A.S., Polyushkina T.N., Guglielmi A.V. Troitskaya–Bolshakova effect as a manifestation of the solar wind wave turbulence, *Planetary Space Sci.*, 2017.
- Russell C.T., Hoppe M.M., Upstream waves and particles, *Space Sci. Rev.*, 1983, vol. 34, no. 2, pp. 155-172.
- Troitskaya V.A., Pulsations of the Earth's electromagnetic field with periods of 1 to 15 seconds and their connection with phenomena in the high atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 1961, vol. 66, no. 1, pp. 5-18.
- Troitskaya V.A., Classification of fast variations of the magnetic field and terrestrial currents, *Geomagnetizm i aeronomiya* (Geomagnetism and Aeronomy), 1964, vol. 4, no. 3, pp. 615-616. (in Russian).