

СЕВЕРНО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

NORTH-SOUTH ASYMMETRY OF ULTRA-LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS OF EARTH'S ELECTROMAGNETIC FIELD

А.В. Гульельми

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, guglielmi@mail.ru*

Б.И. Клайн

*ГО «Борок» ИФЗ РАН,
Ярославская обл., Борок, Россия, klb314@mail.ru*

А.С. Потапов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru*

A.V. Guglielmi

*Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, guglielmi@mail.ru*

B.I. Klain

*Borok Geophysical Observatory of IPE RAS,
Yaroslavl Region, Borok, Russia, klb314@mail.ru*

A.S. Potapov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, potapov@iszf.irk.ru*

Аннотация. В статье представлен результат экспериментального исследования северно-южной асимметрии ультранизкочастотных электромагнитных колебаний IPCL по данным наблюдения в обсерватории «Мирный» (Антарктида). IPCL возбуждаются в дневном секторе овала полярных сияний в диапазоне периодов 3–10 мин и представляют собой один из самых мощных типов колебаний магнитосферы Земли. Эти колебания были обнаружены в 70-х гг. прошлого века в ходе полярных экспедиций ИФЗ АН СССР, организованных проф. В.А. Троицкой. Мы показали, что активность IPCL в «Мирном» зависит от наклона силовых линий межпланетного магнитного поля (ММП) к плоскости геомагнитного экватора (северно-южной асимметрии) перед фронтом магнитосферы. Результат свидетельствует о контролирующем воздействии ММП на режим колебаний магнитосферы и дает основание высказать гипотезу о том, что IPCL представляют собой вынужденные колебания нелинейной динамической системы, важнейшими структурными элементами которой являются дневные полярные каспы. Статья посвящается памяти профессора В.А. Троицкой (1917–2010).

Ключевые слова: магнитосфера, солнечный ветер, геомагнитные пульсации, межпланетное магнитное поле, Антарктида.

Abstract. In the paper, we present the result of an experimental study of north-south asymmetry of ultra-low-frequency electromagnetic oscillations IPCL. This study is based on observations made at obs. Mirny (Antarctica). IPCL are excited in the dayside sector of the auroral oval in the range of 3–10 min periods and represent one of the most powerful types of oscillations of Earth's magnetosphere. These oscillations were discovered in the 1970s during IPHE AS USSR polar expeditions organized by Prof. V.A. Troitskaya. We have shown that IPCL activity in Mirny depends on the inclination (north-south asymmetry) of interplanetary magnetic field (IMF) lines to the plane of the geomagnetic equator before the front of the magnetosphere. The result suggests a controlling exposure of IMF on the magnetospheric oscillations and gives rise to the hypothesis that IPCL are forced oscillations of a nonlinear dynamical system whose major structural elements are dayside polar cusps. The paper is dedicated to the memory of Professor V.A. Troitskaya (1917–2010).

Keywords: magnetosphere, solar wind, geomagnetic pulsations, interplanetary magnetic field, Antarctica.

ВВЕДЕНИЕ

Систематика геомагнитных пульсаций была разработана в начале 60-х гг. прошлого века [Троицкая, 1964]. Она до сих пор успешно используется при описании ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных колебаний магнитосферы Земли (см., например, обзоры [Troitskaya, Guglielmi, 1967; Троицкая, Гульельми, 1969; Гульельми, Троицкая, 1978; Гульельми, 1989; 2007] и монографии [Jacobs, 1970; Гульельми, Троицкая, 1973; Nishida, 1978; Гульельми, 1979; Guglielmi, Pokhotelov, 1996]). В основу классификации положен морфологический принцип, и введена биномиальная номенклатура. Все виды колеба-

ний разделены на два класса: Pc (регулярные колебания, pulsations continuous) и Pi (иррегулярные колебания, pulsations irregular). Отличительным признаком класса служит форма осциллограммы. Вид обозначается символом PcN (N=1–5) или PiN (N=1–2), где цифра N отвечает номеру поддиапазона общего диапазона ультранизких частот. Первоначально классу Pc был выделен диапазон периодов 0.2–600 с, а классу Pi — диапазон 1–150 с. Вскоре, однако, выяснилось, что диапазон Pi следует расширить, и, соответственно, был добавлен вид Pi3 для обозначения иррегулярных колебаний в диапазоне 150–600 с. Именно об этом виде колебаний магнитосферы и пойдет речь в данной статье.

Наблюдения свидетельствуют, что по морфологическим признакам виды УНЧ-колебаний четко подразделяются на многочисленные типы, или, лучше сказать, разновидности. Мы сосредоточим внимание на той разновидности Pi3, которую в литературе часто называют сокращенно IPCL (irregular pulsations continuous long). Из расшифровки аббревиатуры видно, что данная разновидность, являясь иррегулярными колебаниями, имеет свойство быть непрерывными (continuous). В подобных случаях после числа, указывающего номер поддиапазона, для большей ясности ставят букву С. Например, разновидность Pi1, имеющая внесистемное название auroral agitation, иногда обозначают как Pi1C [Troitskaya, 1961; Калишер, 1975]. Аналогичным образом можно было бы вместо IPCL использовать обозначение Pi3C. Это точное указание на колебания IPCL в рамках систематики УНЧ-колебаний, принципы которой были заложены проф. В.А. Троицкой. Мы, однако, сохраним аббревиатуру IPCL, следуя традиции, сложившейся в последние годы в геомагнетизме.

Приведем некоторые сведения о морфологии IPCL. Подробную информацию по этому вопросу можно найти в статьях [Bolshakova et al., 1974; Troitskaya, Bolshakova, 1977, 1988; Troitskaya, 1985; Клайн и др., 2008]. Рисунок 1 дает представление об осциллограмме колебаний, зарегистрированных в обсерватории «Мирный» (исправленные геомагнитные координаты $\Phi = -76.93^\circ$, $\Lambda = 122.92^\circ$). Спектр колебаний широкий, характерные периоды лежат в интервале 3–10 мин. Амплитуда колебаний изменяется с типичными значениями 5–10 нТл и временами достигает многих десятков нанотесл. Сезонная активность IPCL характеризуется летним максимумом. В среднем амплитуда повышается с ростом скорости солнечного ветра. Обычно колебания наблюдаются при низкой и умеренной геомагнитной активности ($K_p = 0-3$).

Наиболее постоянный отличительный признак IPCL состоит в том, что, как уже было сказано выше, колебания наблюдаются в дневном секторе овала сияний. Именно это свойство натолкнуло нас на мысль сформулировать гипотезу о возможном механизме возбуждения IPCL и подсказало идею проверки гипотезы путем поиска северно-южной асимметрии колебаний. Дело нам представлялось следующим образом. Если существует северно-южная асимметрия, зависящая от ориентации силовых линий межпланетного магнитного поля (ММП), то это новое, не известное ранее свойство IPCL будет аргументом в пользу нашей гипотезы о механизме возбуждения.

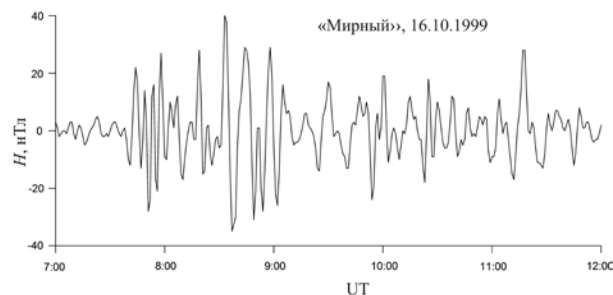


Рис. 1. Магнитограмма УНЧ-колебаний IPCL, зарегистрированных 16.10.1999 в обсерватории «Мирный» (Антарктида)

В разделе 1 мы выдвигаем оригинальную гипотезу о возбуждении IPCL, в разделе 2 предлагаем метод проверки гипотезы, а в разделе 3 делаем критическую проверку. Альтернативные механизмы возбуждения мы упоминаем в разделе 4, а в заключительной части статьи мы подводим итог нашего исследования IPCL.

1. СЦЕНАРИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ IPCL

На дневной стороне магнитопаузы существует два структурных образования. Они располагаются на высоких широтах примерно симметрично относительно плоскости геомагнитного экватора. Их называют каспами (cusps) [Yamauchi et al., 1996]. Через каспы горячая плазма солнечного ветра проникает вглубь магнитосферы. Нас, однако, интересуют не потоки плазмы, а УНЧ-колебания. В связи с этим обратим внимание на два свойства каспов, исключительно важных с точки зрения физики колебаний IPCL. Первое свойство состоит в том, что касп проецируется силовыми линиями геомагнитного поля в зону наиболее частой повторяемости и максимальной амплитуды IPCL.

Второе свойство менее очевидно. По-видимому, касп является своеобразным аттрактором для поверхностных МГД-волн, возбуждаемых на магнитопаузе в результате неустойчивости Кельвина—Гельмгольца. Другими словами, касп, по всей вероятности, обладает фокусирующими свойствами. На это указывает следующее качественное рассуждение. В каспе понижено магнитное поле B и повышена плотность плазмы ρ . Следовательно, в каспе находится минимум скорости Альвена:

$$c_A = B / \sqrt{4\pi\rho}.$$

Из лучевой теории МГД-волн известно, что в неоднородной магнитоактивной плазме лучи изгибаются в сторону уменьшения величины c_A [Гульельми, 1985]. Эти общие соображения, разумеется, не решают проблему распространения поверхностных волн в окрестности каспа на должном физико-математическом уровне, но все же делают довольно правдоподобным наше предположение о фокусирующих свойствах каспа.

Здесь необходимо внести одно уточнение. При сечении магнитосферы плоскостью полуденного меридиана магнитопауза представляет собой кривую линию, выпуклую в сторону Солнца, а два каспа выглядят как острия, направленные к Земле. В трехмерном же пространстве касп похож не на воронку, как можно было бы подумать, если иметь в виду обычное толкование слова, а на щель (клефт, cleft), ориентированную в западно-восточном направлении. Поэтому если рассматривать фокусирующие свойства каспа, то надо проводить аналогию не со сферической, а с цилиндрической линзой.

Итак, есть основание считать, что в касп стекается энергия поверхностных волн. Но ведь касп проецируется на поверхность Земли именно в ту зону, где мы наблюдаем колебания IPCL. Вполне естественно предположить, что колебания каспа возбуждают волны Альвена, которые переносят энергию колебаний вдоль геомагнитных силовых линий до земной поверхности. При перемещении от каспа до его проек-

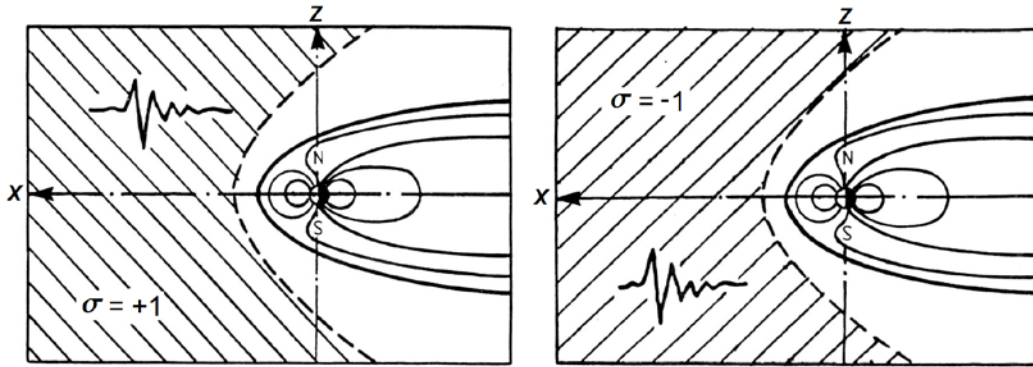


Рис. 2. Сечения магнитосферы плоскостью полуденного меридиана при двух ориентациях ММП [Гульельми, Потапов, 2017]

ции на ионосферу амплитуда колебаний увеличивается. Лучевая теория предсказывает, что амплитуда колебаний магнитного поля пропорциональна $\rho^{1/4}$ [Lundin, Guglielmi, 2006]. Это дает нам ориентировочную оценку повышения амплитуды на порядок при переходе от каспа до Земли.

Вырисовывается интересная картина. Существует динамическая система, элементами которой являются касп и геомагнитные силовые линии, проецирующие касп на земную поверхность. Колебания системы мы наблюдаем в виде IPCL. Как и во многих других подобных случаях, нас интересует кардинальный вопрос: что мы наблюдаем — автоколебания или вынужденные колебания динамической системы? Вопрос нельзя решить из априорных соображений, поскольку наша система не является автономной. Необходимо придумать решающий эксперимент, который прояснит ситуацию. Однако может оказаться, что поставленный выше вопрос не имеет однозначного ответа, поэтому мы облегчим себе задачу и будем искать ответ на вопрос в ослабленной формулировке. А именно, попытаемся выяснить на эксперименте, воздействуют ли переменные вынуждающие силы на режим возбуждения колебаний IPCL.

2. МЕТОД ПРОВЕРКИ

Итак, у нас нет достоверных сведений относительно механизма возбуждения колебаний IPCL и нет возможности произвести физико-математическое моделирование колебательного процесса, имитирующего IPCL, поскольку устройство нашей динамической системы известно лишь в самых общих чертах. Обнаруженное на опыте явление перемежаемости (intermittency) в режиме возбуждения IPCL [Клайн и др., 2008] свидетельствует о том, что мы, скорее всего, имеем дело с сильно нелинейной диссипативной колебательной системой. Однако, в сущности, устройство и функционирование системы нам неизвестны, поэтому вполне уместно воспользоваться понятием «черного ящика» с выходом и входом [Эшби, 1959]. На выходе нашего «черного ящика» мы наблюдаем колебания IPCL. Попытаемся каким-то образом «воздействовать» на вход, чтобы по реакции на выходе составить некоторое представление о механизме функционирования системы. В качестве входа естественно рассматривать жерло каспа.

Здесь следует напомнить о существенном отличии лабораторных экспериментов такого рода от экспериментов в магнитосфере. Если в лаборатории экспериментатор может по своему выбору подавать на вход те или иные зондирующие импульсы и по реакции на выходе судить о функционировании динамической системы, то, за редким исключением, в магнитосфере это невозможно. Нам остается лишь одно: руководствуясь общими знаниями о структуре и динамике околоземного пространства, ожидать внешнего воздействия на вход системы для критической проверки той или иной гипотезы путем анализа явлений, наблюдающихся на выходе системы. Наша идея проверки гипотезы о IPCL как о вынужденных колебаниях состоит в том, чтобы частично контролировать внешние вынуждающие воздействия на жерло каспа, используя данные об ориентации ММП.

Выше мы представили вынуждающие силы в виде поверхностных МГД-волн, для которых касп является цилиндрической линзой. Но касп обладает фокусирующими свойствами и для объемных МГД-волн, существующих перманентно перед фронтом околоземной ударной волны, проникающих в переходный слой и достигающих магнитопаузы. Мы знаем, что режим облучения магнитопаузы объемными волнами контролируется ориентацией ММП [Гульельми и др., 2015]. Это знание мы используем для поиска ответа на вопрос, поставленный в конце предыдущего раздела статьи.

Поясним сказанное с помощью рис. 2. На нем схематически показаны две проекции магнитосферы на плоскость полуденного меридиана при двух различных ориентациях силовых линий ММП. Каспы располагаются в промежутке между замкнутыми и разомкнутыми линиями геомагнитного поля. Штриховая линия изображает фронт околоземной ударной волны. Наклонные линии изображают силовые линии ММП. Между фронтом и силовой линией ММП, касающейся фронта, располагается так называемый форшок — специфическая область околоземного пространства, в которой перманентно возбуждаются сильные флуктуации электромагнитного поля в диапазоне частот от миллигерц до нескольких килогерц. Возбуждение происходит в результате пучковой неустойчивости межпланетной плазмы, взаимодействующей с фронтом ударной волны [Russell,

Норре, 1983]. На рис. 2 флуктуации изображены условно в виде волновых пакетов. Идея метода проверки гипотезы состоит в том, что воздействие на тот или иной касп флуктуаций, проникающих через ударный фронт и достигающих магнитопаузы, может быть ослаблено или усилено в зависимости от ориентации ММП.

Введем дихотомическую переменную $\sigma = \text{sign}(B_x B_z)$, принимающую значения $\sigma = -1$ при $B_x B_z < 0$ и $\sigma = +1$ при $B_x B_z > 0$, где B_x и B_z — компоненты ММП в системе координат, указанной на рис. 2. Мы видим, что силовые линии скошены к северу при $\sigma = +1$ и к югу при $\sigma = -1$. Следовательно, асимметрия расположения форшока относительно плоскости экватора качественно изменяется при изменении знака σ . Очевидно, что электромагнитные волны, возбужденные в области форшока, будут проникать по преимуществу в Северное (Южное) полушарие при $\sigma = +1$ ($\sigma = -1$).

Эти соображения подсказывают нам процедуру проверки гипотезы: следует проверить на эксперименте, действительно ли активность колебаний IPCL, зарегистрированных, например, в обсерватории Южного полушария, выше при $\sigma = -1$, чем при $\sigma = +1$. В следующем разделе мы опишем результат проверки по данным наблюдения IPCL в обсерватории «Мирный», расположенной в Южном полушарии.

3. СЕВЕРНО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ IPCL

Мы начнем издалека и напомним о восьмимерном пространстве управляющих параметров (ПУП), которое было введено в работе [Гульельми и др., 2015] для систематического изучения роли ММП в формировании режима возбуждения УНЧ-колебаний магнитосферы. Визуализация данных о IPCL в ПУП является важной частью качественного исследования экспериментальных данных. Мы используем метод визуализации, основанный на расположении точек в пространстве меньшей размерности [Дэйвисон, 1988].

На рис. 3 дан пример представления событий в трехмерном пространстве, образованном компонентами ММП. Событием мы называем часовой интервал наблюдения IPCL в обсерватории «Мирный». Богатейший архив записей УНЧ-колебаний, которые были зарегистрированы в «Мирном» во время антарктических экспедиций ИФЗ АН СССР, организованных В.А. Троицкой, хранится в обсерватории «Борок». Один из авторов статьи (Б.И. Клайн) использовал архивные материалы, а также базу данных МЦД [<http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html>] для построения рис. 3.

Отбор, обработка и анализ событий производился следующим образом. Путем просмотра магнитограмм за 1999 г. отобраны события, зарегистрированные в интервале ± 2 ч относительно местного геомагнитного полудня, который соответствует 8 ч мирового времени, при том дополнительном ограничении, что индексы геомагнитной активности удовлетворяют условиям $K_p < 3$, $Dst > -30$ нТл, т. е. магнитосфера находится в относительно спокойном состоянии. Всего было найдено 95 событий. С каждым событием соотнесены среднечасовые значения

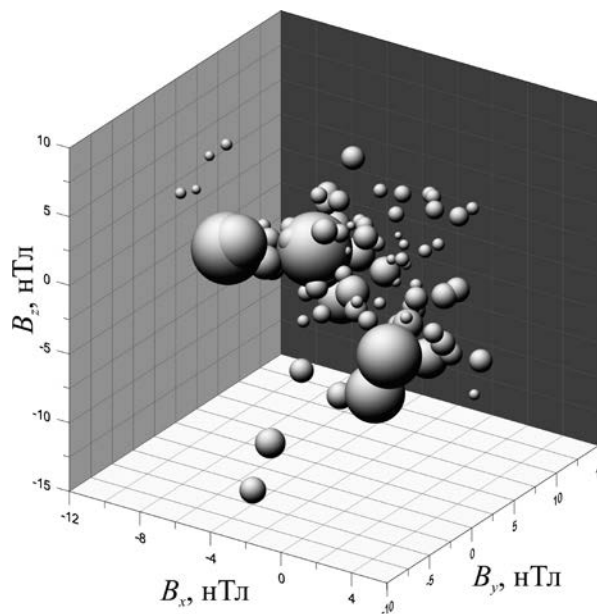


Рис. 3. Распределение событий в трехмерном пространстве управляющих параметров, образованном компонентами ММП. Радиусы шаров пропорциональны амплитуде колебаний IPCL

трех компонент ММП, указанные в каталоге OMNI2 [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>]. Кроме того, каждое событие анализировалось на предмет определения доминирующего периода и среднечасовой амплитуды колебаний. Для этого анализировались динамические спектры и определялись огибающие амплитуды сигналов с использованием преобразования Гильберта. В результате оказалось, что в среднем по выборке период составляет 3.5 мин, а амплитуда 6 нТл.

Как показывает рис. 3, амплитуда колебаний (она пропорциональна радиусу шара) довольно изменчива. Мысленно проецируя центры шаров на горизонтальную плоскость, мы видим, что в большинстве случаев колебания наблюдаются при $\text{sign}(B_x B_y) < 0$. Это вполне соотносится с наиболее типичной конфигурацией силовых линий ММП, закрученных в спирали Паркера вследствие вращения Солнца [Паркер, 1965]. Таким образом, рис. 3 выдерживает элементарный тест на наличие содержательной информации в трехмерном подпространстве ПУП.

Рассмотрим теперь рис. 4. Он похож на рис. 3 за тем исключением, что вместо B_y использована азимутальная компонента E_y межпланетного электрического поля, а вместо B_z использован аргумент $B_x B_z$ функции σ , введенной нами в разделе 2. Мы видим, что IPCL наблюдаются в Южном полушарии чаще при $\sigma = -1$, чем при $\sigma = +1$. На качественном уровне это вполне согласуется с нашей гипотезой о существовании северно-южной асимметрии возбуждения IPCL. Не вызывает сомнения, что в Северном полушарии IPCL наблюдаются чаще при $\sigma = +1$, чем при $\sigma = -1$. (Тем не менее мы планируем провести проверку этого утверждения по данным наблюдения УНЧ-колебаний в обсерваториях, расположенных в Гренландии.)

Для количественной оценки достоверности существования северно-южной асимметрии мы сделали сравнительный анализ распределений IPCL по амплитуде при $\sigma = -1$ и при $\sigma = +1$. Оба распределения

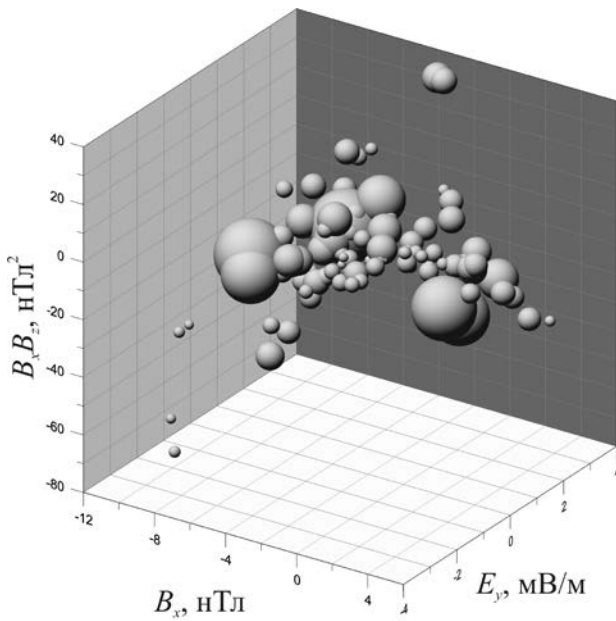


Рис. 4. Распределение событий в трехмерном пространстве, образованном разнородными компонентами общего пространства управляющих параметров

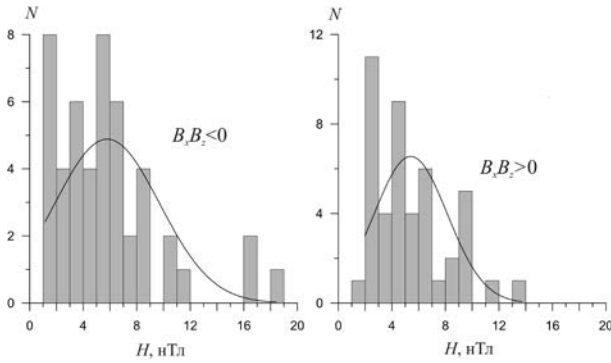


Рис. 5. Распределения УНЧ-колебаний IPCL по амплитуде

показаны на рис. 5. Гауссовы аппроксимации распределений представлены сплошными линиями. Размах, среднее значение амплитуды и дисперсия равны 21 нТл, 6.4 нТл и 24.3 нТл² при $\sigma = -1$, и 12 нТл, 5.4 нТл и 7.68 нТл² при $\sigma = +1$. По критерию Фишера различие между двумя выборками статистически достоверно на уровне значимости 0.05. Другими словами, можно достаточно уверенно утверждать, что активность IPCL в «Мирном» повышается в тех случаях, когда электромагнитные шумы, зарождающиеся в области форшока, воздействуют на южную полусферу магнитосферы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В своем исследовании мы использовали классическую схему «черный ящик» с выходом и входом» [Эшби, 1959]. Слабое место нашей методологии состоит в том, что она не исключает гипотетическую возможность существования автогенератора, связанного с каспом, на который воздействуют внешние шумы, хаотично изменяя режим автоколебаний. Хотя у нас пока что нет свидетельств автоколебательного происхождения IPCL, с принципиальной точки зрения такую возможность надо иметь в виду. Отличить вынужденные колебания от автоко-

лебаний позволяют известные методы статистической радиофизики. В прошлом они оказались весьма успешными при изучении колебаний Pi1C [Калишер, 1975] и Pc4 [Гульельми, 1989]. Аналогичное исследование целесообразно провести и в отношении IPCL. В этом случае эффективным может оказаться метод исследования динамических систем по схеме «черный ящик» без входа» [Гудзенко, 1962].

Продолжая обсуждение, обратимся еще раз к рис. 3. Он послужил для нас своего рода тестом на предмет проверки информативности трехмерных подпространств общего пространства управляющих параметров. Проверка оказалась удовлетворительной, хотя, конечно, информация о преимущественной ориентации силовых линий ММП в плоскости $x-y$ в период наблюдения IPCL является тривиальной. В связи с этим мы указали в предыдущем разделе на характерное для ММП неравенство $\text{sign}(B_x B_y) < 0$. Вполне понятно, что это неравенство не накладывает никаких ограничений на знак B_x , который зависит от того, в каком секторе ММП находится Земля — в положительном ($B_x < 0$) или в отрицательном ($B_x > 0$). Между тем на рис. 3 мы отчетливо видим, что колебания IPCL наблюдаются в «Мирном» преимущественно при $B_x < 0$, т. е. в то время, когда Земля находится в положительном секторе, и это удивительно. Рассуждая логически, мы должны предположить, что в Северном полушарии колебания IPCL будут наблюдаться по преимуществу в то время, когда Земля находится в отрицательном секторе ММП. Мы планируем провести проверку этого предположения по данным наблюдения УНЧ-колебаний в Гренландии.

Судя по всему, мы неожиданно обнаружили еще одно проявление северно-южной асимметрии возбуждения колебаний IPCL. Этот тип асимметрии связан не с ориентацией форшока относительно плоскости геомагнитного экватора, а со знаком сектора ММП. Возникает интересная проблема интерпретации данного факта. Мы не исключаем, что наблюдения указывают на нетривиальный механизм пересоединения (reconnection) силовых линий ММП с геомагнитными силовыми линиями в окрестности каспа.

В завершение данного раздела статьи упомянем о работе [Гульельми, Потапов, 2017]. В ней был предпринят успешный поиск северно-южной асимметрии колебаний Pc1 в ионосферном резонаторе Альвена—Беляева. Еще одна попытка была стимулирована работой [Бучаченко, 2014], в которой выдвинута идея о возможном изменении магнитопластических свойств горных пород в очаге готовящегося землетрясения при воздействии на очаг переменного электромагнитного поля. Ориентация ММП, как мы убедились, контролирует перераспределение электромагнитной энергии весьма мощных УНЧ-колебаний между Северным и Южным полушарием. В связи с этим возникла мысль о поиске северно-южной асимметрии глобальной сейсмичности. Зотов О.Д. предпринял пилотный анализ каталогов землетрясений, но не нашел признаков изменения северно-южной асимметрии сейсмичности при изменениях ориентации ММП [Гульельми, Потапов, Довбня и др., 2017]. Вместе с тем в ходе исследо-

вания было обнаружено небольшое, но статистически достоверное повышение сейсмичности в дни, когда Земля пересекала границы между секторами ММП. Однако описание этого результата будет представлено в отдельной публикации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали северно-южную асимметрию УНЧ-колебаний электромагнитного поля Земли в зависимости от ориентации силовых линий ММП. В качестве объекта исследования были выбраны мощные колебания типа IPCL, наблюдаемые в обсерватории «Мирный» в околополуденные часы при спокойных геомагнитных условиях. Из геометрических соображений была высказана гипотеза о том, что активность IPCL в «Мирном» зависит от наклона силовых линий ММП к плоскости геомагнитного экватора (северно-южной асимметрии). Был предложен метод проверки, сущность которого состоит в том, что воздействие на северную или южную полусферу магнитосферы может быть усилено или ослаблено в зависимости от ориентации ММП. Результат исследования подтвердил нашу гипотезу. Это делает правдоподобным предположение о том, что IPCL представляют собой вынужденные колебания нелинейной динамической системы, важнейшими структурными элементами которой являются дневные полярные каспы.

Эта статья написана нами в память о нашем учителе — профессоре Валерии Алексеевне Троицкой к столетию со дня ее рождения. Широко известен ее выдающийся вклад в исследование колебаний магнитосферы Земли. Наше исследование колебаний IPCL свидетельствует, что оригинальные методы и подходы В.А. Троицкой к изучению колебаний электромагнитного поля Земли, а также ее фундаментальные открытия актуальны и в наши дни. Работа частично выполнена при финансовой поддержке Программы 15 Президиума РАН и проектов РФФИ № 16-05-00056 и 16-05-00631.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бучаченко А.Л. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу? // УФН. 2014. Т. 184, № 1. С. 101–108.

Гудзенко Л.И. Статистический метод определения характеристик нерегулируемой автоколебательной системы // Изв. вузов. Радиофизика. 1962. Т. 5, № 3. С. 572–586.

Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979. 139 с.

Гульельми А.В. Лучевая теория распространения МГД-волн (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. 1985. Т. 25, № 3. С. 356–370.

Гульельми А.В. Гидромагнитная диагностика и геоэлектрическая разведка // УФН. 1989. Т. 158, Вып. 4. С. 605–637.

Гульельми А.В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // УФН. 2007. Т. 177, № 12. С. 1257–1276.

Гульельми А.В., Потапов А.С. Влияние межпланетного магнитного поля на УНЧ-колебания ионосферного резонатора // Косм. иссл. 2017. Т. 55, № 4. С. 263–267.

Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.

Гульельми А.В., Троицкая В.А. МГД-волны в околоземном космическом пространстве // Физика Земли. 1978. № 10. С. 95–104.

Гульельми А.В., Потапов А.С., Довбня Б.В. Ключевая роль межпланетного магнитного поля в формировании режима колебаний магнитосферы Земли // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы третьего Всероссийского семинара-совещания (Москва, 16–19 июня 2015 г.) / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2015. С. 328–334.

Гульельми А.В., Потапов А.С., Довбня Б.В. и др. Триггерные эффекты в магнитосфере: к столетию В.А. Троицкой // IV Всероссийская конференция с международным участием «Триггерные эффекты в геосистемах». Москва, 6–9 июня 2017 г.: тезисы докладов. М.: ГЕОС, 2017. С. 28–29.

Дэйвисон М. Многомерное шкалирование: методы наглядного представления данных. М.: Финансы и статистика, 1988. 254 с.

Калишер А.Л. Функция распределения амплитуды геомагнитных пульсаций типа AA // Геомагнетизм и аэронавигация. 1975. Т. 15, № 5. С. 952–953.

Клайн Б.И., Куражковская Н.А., Куражковский А.Ю. Переменяемость в волновых процессах // Физика Земли. 2008. № 10. С. 25–34.

Паркер Е. Динамические процессы в межпланетной среде. М.: Мир, 1965. 302 с.

Троицкая В.А. Классификация быстрых вариаций магнитного поля и земных токов // Геомагнетизм и аэронавигация. 1964. Т. 4, № 3. С. 615–616.

Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // УФН. 1969. Т. 97, Вып. 3. С. 453–494.

Эшби У.Р. Введение в кибернетику. М.: ИЛ, 1959. 432 с.

Bolshakova O.V., Troitskaya V.A., Hessler V.P. On the connection of the position of the polarward boundary of the polar cusp with the intensity of IPCL // Proc. International Symposium on Solar-Terrestrial Physics. Sao Paulo, Brazil, June 17–22, 1974. 1974. V. 2, A75-22580 08-92. P. 180–184.

Guglielmi A.V., Pokhotelov O.A. Geoelectromagnetic Waves. Bristol and Philadelphia: IOP Publ. Ltd, 1996. 402 p.

Jacobs J.A. Geomagnetic Micropulsations. New York; Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, 1970. 179 p.

Lundin R., Guglielmi A. Ponderomotive forces in cosmos // Space Sci. Rev. 2006. V. 127. P. 1–116.

Nishida A. Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere. New York; Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, 1978. 256 p.

Russell C.T., Hoppe M.M. Upstream waves and particles // Space Sci. Rev. 1983. V. 34. P. 115–172.

Troitskaya V.A. Pulsations of the Earth's electromagnetic field with periods of 1–15 s and their connection with phenomena in the high atmosphere // J. Geophys. Res. 1961. V. 66, N 1. P. 5–18.

Troitskaya V.A. ULF wave investigations in the dayside cusp // Adv. Space Res. 1985. V. 5, N 4. P. 219–228.

Troitskaya V.A., Bolshakova O.V. Diurnal latitude variation of the location of the dayside cusp // Planet. Space Sci. 1977. V. 25. P. 1167–1169.

Troitskaya V.A., Bolshakova O.V. Diagnostics of the magnetosphere using multipoint measurements of ULF waves // Adv. Space Res. 1988. V. 8. P. 413–425.

Troitskaya V.A., Guglielmi A.V. Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere // Space Sci. Rev. 1967. V. 7, N 5/6. P. 689–769.

Yamauchi M., Nilsson H., Eliasson L., et al. Dynamic response of the cusp morphology to the solar wind: a case study during passage of the solar wind plasma cloud on February 21, 1994 // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 24675–24687.

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> (дата обращения 10 ноября 2017 г.).

URL: <http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html> (дата обращения 10 ноября 2017 г.).

REFERENCES

- Ashby W.R. *Vvedenie v kibernetiku* [Introduction into Cybernetics]. Moscow, IL Publ., 1959, 432 p. (In Russian). English edition: An Introduction to Cybernetics. London, Chapman and Hall LTD, 1957, 303 p.
- Bolshakova O.V., Troitskaia V.A., Hessler V.P. On the connection of the position of the polarward boundary of the polar cusp with the intensity of IPCL. Proc. International Symposium on Solar-Terrestrial Physics. Sao Paulo, Brazil, June 17–22, 1974, vol. 2, A75-22580 08-92, pp. 180–184.
- Buchachenko A.L. Magnetoplasticity and physics of earthquakes. Can we prevent a catastrophe? *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi]. 2014, vol. 184, no. 1, pp. 101–108. (In Russian).
- Davison M. *Mnogomernoe shkalirovanie: metody naglyadnogo predstavleniya dannykh* [Multidimensional Scaling: Methods of Visual Representation of Data]. Moscow, Finansy i Statistika Publ., 1988, 254 p. (In Russian).
- Gudzenko L.I. Statistical method for determining characteristics of non-adjustable self-oscillatory system. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Radiophysics and Quantum Electronics]. 1962, vol. 5, no. 3, pp. 572–586. (In Russian).
- Guglielmi A.V. *MGD-volny v okolozemnoi plazme* [MHD Waves in the Near-Earth Plasma]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 139 p. (In Russian).
- Guglielmi A.V. Ray theory of MHD wave propagation (Overview). *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1985, vol. 25, no. 3, pp. 356–370. (In Russian).
- Guglielmi A.V. Hydromagnetic diagnostics and geoelectric survey. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi]. 1989, vol. 158, iss. 4, pp. 605–637. (In Russian).
- Guglielmi A.V. Ultra-low-frequency electromagnetic waves in the Earth's crust and magnetosphere. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi]. 2007, vol. 50, no. 12, pp. 1197–1216. (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. Effect of interplanetary magnetic field on ULF oscillations of ionospheric resonator. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Research]. 2017, vol. 55, no. 4, pp. 263–267. (In Russian).
- Guglielmi A.V., Troitskaya V.A. *Geomagnitnye pulsatsii i diagnostika magnitosfery* [Geomagnetic Pulsations and Diagnostics of the Magnetosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 208 p. (In Russian).
- Guglielmi A.V., Troitskaya V.A. MHD waves in the near-Earth space. *Fizika Zemli* [Izvestiya, Physics of the Solid Earth]. 1978, no. 10, pp. 95–104. (In Russian).
- Guglielmi A.V., Potapov A.S., Dovbnya B.V. Key role of interplanetary magnetic field in forming oscillation regime of the Earth's magnetosphere. *Triggernye efekty v geosistemakh: materialy III Vserossiiskogo seminara-soveshchaniya* [Trigger Effects in Geosystems: Proc. Third National Seminar-Workshop]. Moscow, June 16–19, 2015. Moscow, GEOS Publ., 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: on the 100th anniversary of V.A. Troitskaya. IV Vserossiiskaya konferentsiya “Triggernye efekty v geosistemakh”: tezisy dokladov [IV National Conference “Trigger Effects in Geo-systems”: Abstracts]. Moscow, June 6–9, 2017. Moscow, GEOS Publ., 2017, pp. 28–29. (In Russian).
- Jacobs J.A. *Geomagnetic Micropulsations*. New York, Heidelberg, Berlin, Springer-Verlag, 1970, 179 p.
- Kalisher A.L. Amplitude distribution function of AA-type geomagnetic pulsations. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy]. 1975, vol. 15, no. 5, pp. 952–953. (In Russian).
- Klain B.I., Kurazhkovskaya N.A., Kurazhkovsky A.Yu. Intermittency in wave processes. *Fizika Zemli* [Izvestiya, Physics of the Solid Earth]. 2008, no. 10, pp. 25–34. (In Russian).
- Lundin R., Guglielmi A. Ponderomotive forces in cosmos. *Space Sci. Rev.* 2006, vol. 127, pp. 1–116.
- Nishida A. *Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere*. New York, Heidelberg, Berlin, Springer-Verlag, 1978, 256 p.
- Parker E. *Dinamicheskie protsessy v mezplanetnoi srede* [Dynamic Processes in Interplanetary Medium]. Moscow, Mir Publ., 1965, 302 p. (In Russian). English edition: Interplanetary Dynamic Processes. Interscience Publishers, 1963, 272 p.
- Russell C.T., Hoppe M.M. Upstream waves and particles. *Space Sci. Rev.* 1983, vol. 34, pp. 115–172.
- Troitskaya V.A. Pulsations of the Earth's electromagnetic field with periods of 1–15 sec 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 rapid pulsations of the magnetic field and Earth currents. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1964, vol. 4, pp. 490–495. (In Russian).
- Troitskaya V.A. ULF wave investigations in the dayside cusp. *Adv. Space Res.* 1985, vol. 5, no 4, pp. 219–228.
- Troitskaya V.A., Bolshakova O.V. Diurnal latitude variation of the location of the dayside cusp. *Planet. Space Sci.* 1977, vol. 25, pp. 1167–1169.
- Troitskaya V.A., Bolshakova O.V. Diagnostics of the magnetosphere using multipoint measurements of ULF waves. *Adv. Space Res.* 1988, vol. 8, pp. 413–425.
- Troitskaya V.A., Guglielmi A.V. Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere. *Space Sci. Rev.* 1967, vol. 7, no. 5/6, pp. 689–769.
- Troitskaya V.A., Guglielmi A.V. Geomagnetic pulsations and diagnostics of the magnetosphere. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Soviet Physics. Uspekhi]. 1969, vol. 12, no. 2, pp. 195–218. (In Russian).
- Yamauchi M., Nilsson H., Eliasson L., Norberg O., Boehm M., Clemmons J.H., Lepping R.P., Blomberg L., Ohtani S.-I., Yamamoto T., Mukai T., Terasawa T., Kokubun S. Dynamic response of the cusp morphology to the solar wind: a case study during passage of the solar wind plasma cloud on February 21, 1994. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 101, pp. 24675–24687.
- URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> (accessed November 10, 2017).
- URL: <http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html> (accessed November 10, 2017).

Как цитировать эту статью

Гульельми А.В., Клайн Б.И., Потапов А.С. Северно-южная асимметрия ультранизкочастотных колебаний электромагнитного поля Земли. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 4. С. 27–33. DOI: 10.12737/szf-34201703.