

---

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ,  
ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА  
И МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТИ  
ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pi2**

**EFFECT OF GEOMAGNETIC ACTIVITY, SOLAR WIND AND PARAMETERS  
OF INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD ON REGULARITIES  
IN INTERMITTENCY OF Pi2 GEOMAGNETIC PULSATIONS**

**Н.А. Куражковская**

*Геофизическая обсерватория «Борок», филиал Института  
физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Борок, Ярославская обл., Россия, knady@borok.yar.ru*

**Б.И. Клайн**

*Геофизическая обсерватория «Борок», филиал Института  
физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Борок, Ярославская обл., Россия, klain@borok.yar.ru*

**N.A. Kurazhkovskaya**

*Borok Geophysical Observatory, the Branch of Schmidt Institute  
of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,  
Borok, Yaroslavl oblast, Russia, knady@borok.yar.ru*

**B.I. Klain**

*Borok Geophysical Observatory, the Branch of Schmidt Institute  
of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,  
Borok, Yaroslavl oblast, Russia, klain@borok.yar.ru*

---

**Аннотация.** Приводятся результаты исследования влияния геомагнитной активности, параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) на свойства перемежаемости среднеширотных серий всплесков геомагнитных пульсаций Pi2, наблюдаемых во время магнитосферных суббурь на ночной стороне магнитосферы (суббуревые Pi2) и в их отсутствие (несуббуревые Pi2). В качестве основной характеристики перемежаемости суббуревых и несуббуревых пульсаций Pi2 рассматривается показатель  $\alpha$ , отражающий наклон кумулятивной функции распределения амплитуд всплесков. Показано, что величина и динамика показателя  $\alpha$  различна в зависимости от планетарной геомагнитной активности, авроральной активности и интенсивности магнитосферных кольцевых токов. Обнаружено, что формы зависимостей показателя  $\alpha$  от плотности  $n$ , скорости  $V$ , динамического давления  $P_d$  солнечного ветра и  $B_x$ -компоненты ММП различны. Динамика показателя  $\alpha$  в зависимости от модуля  $B$ ,  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП подобна. Выделены некоторые критические значения  $V$ ,  $P_d$ ,  $B$ ,  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП, при достижении которых нарастающая турбулентность плазмы хвоста магнитосферы во время развития суббурь начинает уменьшаться. Обнаруженные закономерности перемежаемости пульсаций Pi2 могут быть использованы для качественной оценки уровня турбулентности плазмы хвоста магнитосферы в зависимости от изменяющихся межпланетных условий.

**Ключевые слова:** магнитосфера, суббури, геомагнитные пульсации, перемежаемость, турбулентность.

---

**Abstract.** We present the results of investigation of the influence of geomagnetic activity, solar wind and parameters of the interplanetary magnetic field (IMF) on properties of the intermittency of midlatitude burst series of Pi2 geomagnetic pulsations observed during magnetospheric substorms on the nightside (substorm Pi2) and in the absence of these phenomena (nonsubstorm Pi2). We considered the index  $\alpha$  as a main characteristic of intermittency of substorm and nonsubstorm Pi2 pulsations. The index  $\alpha$  characterizes the slope of the cumulative distribution function of Pi2 burst amplitudes. The study indicated that the value and dynamics of the index  $\alpha$  varies depending on the planetary geomagnetic activity, auroral activity and the intensity of magnetospheric ring currents. In addition, the forms of dependences of the index  $\alpha$  on the density  $n$ , velocity  $V$ , dynamic pressure  $P_d$  of the solar wind and IMF  $B_x$ -component are different. The behavior of the index  $\alpha$  depending on the module of  $B$ ,  $B_y$ - and  $B_z$ -components is similar. We found some critical values of  $V$ ,  $P_d$ ,  $B$ ,  $B_y$ - and  $B_z$ -components, after reaching of which the turbulence of the magnetotail plasma during substorm development is decreased. The revealed patterns of the intermittency of Pi2 pulsations can be used for qualitative assessment of turbulence level in the magnetotail plasma depending on changing interplanetary conditions.

**Keywords:** magnetosphere, substorms, geomagnetic pulsations, intermittency, turbulence.

## ВВЕДЕНИЕ

Магнитосфера Земли подвержена постоянному воздействию солнечного ветра, энергия которого накапливается в хвосте магнитосферы за счет пересоединения межпланетного магнитного поля (ММП) и геомагнитного поля. Изменение параметров солнечного ветра влияет на формирование крупномасштабного электрического поля, которое, в свою очередь, определяет развитие плазменных и волновых процессов в хвосте магнитосферы, его конфигурацию и т. д. За процессы взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли ответственны  $B_z$ -компонента ММП и связанное с ней межпланетное электрическое поле  $E_y = -VB_z$ . В частности, количество энергии, обеспечивающей суббуравую активность, контролируется направлением вертикальной компоненты ММП. Это количество энергии резко увеличивается при смене направления  $B_z$ -компоненты с северного на южное [Arnoldy, 1971]. Существенную роль при передаче энергии солнечного ветра в земную магнитосферу играет динамическое давление солнечного ветра  $P_d = \rho V^2$ , где  $\rho$  — плотность плазмы,  $V$  — скорость солнечного ветра. Причем не только  $P_d$  определяет степень сжатия магнитосферы потоком солнечного ветра, но и его флуктуации, наряду с южным направлением  $B_z$ -компоненты ММП, оказывают существенное воздействие на процессы в дневной и ночной магнитосфере [Бородкова, 2010]. Кроме того, такие параметры, как  $B_x$ ,  $B_y$ -компоненты и долгота  $\phi$  вектора напряженности  $B$ , обусловленные секторной структурой ММП, оказывают влияние на геофизические процессы.

В результате накопления энергии солнечного ветра в хвосте возникают суббури, которые относятся к наиболее часто встречающимся магнитным возмущениям в земной магнитосфере [Lui, 2001; Арыков и др., 2002; Tanskanen, 2009]. Фаза развития практически каждой суббури связана с иррегулярными геомагнитными пульсациями Pi2, имеющими вид каплеобразных всплесков или затухающих цугов с периодами  $\sim(40-150)$  с [Saito, 1969; Olson, 1999]. Пульсации Pi2 являются своеобразным индикатором активизации авроральных процессов во взрывной фазе суббури [Rostoker, Olson, 1978]. Однако всплески Pi2 могут наблюдаться также в условиях спокойной магнитосферы, т. е. в отсутствие суббурь на ночной стороне аврорального овала [Kim et al., 2005; Cheng et al., 2009; Куражковская, Клайн, 2010]. Максимум частоты появления пульсаций Pi2 приходится на окологлобальное время, область их наблюдения простирается от экваториальных широт до полярной шапки, а максимум интенсивности приходится на авроральные широты [Пудовкин и др., 1976].

Пульсации Pi2 наблюдаются как изолированные всплески или цуги, а также как последовательности отдельных волновых пакетов (серии всплесков). В работах [Куражковская, Клайн, 2010; 2014] отмечалось, что пульсации Pi2, состоящие из нескольких всплесков, по внешнему виду напоминают сигналы, в которых чередуются редкие выбросы и интервалы спокойного магнитного поля. Подобные сигналы называются перемежающимися, и для них

характерно чередование интервалов регулярного поведения (ламинарные фазы) и хаотических всплесков (турбулентные фазы) [Manneville, Pomeau, 1980; Берже и др., 1991]. Перемежающиеся волновые процессы характеризуются определенными закономерностями. Так, согласно работам [Малинецкий, Потапов, 2000; Писаренко, Родкин, 2007], основными признаками перемежаемости являются экспоненциальное распределение межпиковых интервалов и степенное распределение амплитуд пиков (выбросов). Кумулятивная функция распределения амплитуд выбросов обычно имеет негауссову форму, т. е. для нее характерен длинный хвост. Подобные распределения в литературе называются «распределениями с тяжелыми хвостами» (heavy tails или fat tails) [Малинецкий, Потапов, 2000; Писаренко, Родкин, 2007], которые удовлетворительно описываются степенной функцией вида  $f(x) = x^{-\alpha}$  при всех  $x$ , превышающих некоторый порог  $x_0$  ( $x > x_0$ ). Характерной особенностью перемежаемости является ее тесная связь с турбулентностью среды, в которой формируются выбросы с большой амплитудой. Распределение амплитуды выбросов, формирующихся в слаботурбулизованной среде, как правило, аппроксимируется степенной функцией с показателем, близким к 1. Если среда сильно турбулизована, показатель обычно значительно больше 1 и в экстремальных случаях приближается к 8 [Малинецкий, Потапов, 2000].

Как показывают многочисленные исследования, свойства перемежаемости присущи процессам, имеющим разную природу. Например, турбулентная плазма солнечного ветра, флуктуации ММП и магнитосферная активность (магнитные бури и суббури) обладают свойствами перемежаемости [Consolini, De Michelis, 2005; Рязанцева, Застенкер, 2008; Zotov et al., 2008; Dobias, Wanliss, 2009; Yordanova et al., 2009]. Кроме того, в широком спектре магнитогидродинамических волн были выделены импульсные или всплесковые режимы геомагнитных пульсаций, относящиеся к классу перемежающихся процессов [Клайн и др., 2007; 2008; Kurazhkovskaya, Klain, 2008; Куражковская, Клайн, 2009]. Закономерности перемежаемости характерны для последовательностей всплесков среднеширотных пульсаций Pi2 [Куражковская, Клайн, 2010; 2014], наблюдаемых как во время развития суббурь, так и в их отсутствие на ночной стороне магнитосферы.

В некоторых исследованиях [Клайн и др., 2007; Stepanova et al., 2006] отмечалось, что показатели перемежаемости волновых процессов могут зависеть от многих факторов, таких как магнитное локальное время (MLT), сезон, вариации параметров солнечного ветра и ММП. Например, в работе [Куражковская, Клайн, 2010] установлено, что показатель  $\alpha$ , характеризующий наклон функции распределения амплитуд всплесков Pi2, существенно различается в зависимости от типа суббурь (появляющихся спонтанно или в результате внешнего воздействия на магнитосферу), а также от того, развивается или нет суббура на ночной стороне. В другой работе [Куражковская, Клайн, 2014] обнаружена зависимость показателя  $\alpha$  суббуравых и несуббуравых

всплесков пульсаций Pi2 от MLT, сезона,  $E_y$ -компоненты электрического поля солнечного ветра и долготы ММП ф.

Изучение закономерностей перемежаемости и связанной с ней турбулентности необходимо, с одной стороны, для понимания и объяснения волновых процессов, протекающих в магнитосферной плазме. С другой стороны, по наземным наблюдениям всплесковых режимов можно на качественном уровне оценить степень турбулентности плазмы в различных областях магнитосферы, дополняя спутниковые наблюдения. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования влияния нестационарных процессов в солнечном ветре и ММП на закономерности перемежаемости и, соответственно, на плазменную турбулентность.

Настоящая работа является продолжением исследований [Куражковская, Клайн, 2010; 2014] свойств перемежаемости серий всплесков среднеширотных геомагнитных пульсаций Pi2, наблюдаемых во время суббури и в их отсутствие. Анализируется влияние геомагнитной активности, параметров солнечного ветра и ММП на закономерности перемежаемости суббури и несуббури пульсаций Pi2.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Использовались непрерывные аналоговые записи магнитного поля с разверткой 90 мм/ч на среднеширотной Геофизической обсерватории «Борок» (исправленные геомагнитные координаты  $\Phi'=53.6^\circ$ ;  $\Lambda'=114.4^\circ$ ) с 1994 по 1997 г. За этот же период были взяты односторонние данные AL-индекса Мирового центра данных в Киото [<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>]. Среднечасовые параметры плазмы солнечного ветра и ММП, а также часовые значения  $K_p$ -,  $AE$ -,  $D_{st}$ -индексов взяты из базы данных OMNI [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>].

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА

1. Каждая серия включала от 2–4 до 6–8 всплесков пульсаций Pi2. Изолированные цуги Pi2 не рассматривались. Выборка серий всплесков Pi2 обсерватории «Борок» разбивалась на две группы: суббури и несуббури Pi2. Для этого использовалась процедура идентификации суббури по динамике AL-индекса, подробно изложенная в работе [Hsu, McPherron, 2007]. Как известно, AL-индекс отражает интенсивность западного электроджета, усиление которого свидетельствует о расширении аврорального овала и начале магнитосферной суббури [Akasofu et al., 1965]. Согласно [Hsu, McPherron, 2007], отрицательные бухты продолжительностью более 20 мин и минимальной величиной ниже  $-100$  нТл в динамике AL-индекса соответствуют развитию магнитосферных суббур. Таким образом, по поведению AL-индекса можно определить, на фоне развития суббури в хвосте магнитосферы или в их отсутствие наблюдаются всплесковые режимы пульсаций Pi2. В результате сравнения одновременных данных пульсаций Pi2 и AL-индекса к первой группе были отнесены 576 серий всплесков пульсаций Pi2, наблюдавшихся в пе-

риод развития суббури (суббуриевые Pi2). Во вторую группу вошли 177 серий всплесков пульсаций Pi2, возникающих в отсутствие суббури (несуббуриевые Pi2) на ночной стороне магнитосферы.

На рис. 1 в качестве типичных примеров показаны случаи наблюдения серий всплесков пульсаций Pi2 в период развития суббури (а) и в ее отсутствие (б) на ночной стороне магнитосферы. В верхней части панелей а, б показана динамика AL-индекса, отражающего интенсификацию суббуриевой активности. Ниже дана запись H-компоненты магнитного поля в obs. «Борок». Серия всплесков пульсаций Pi2 (14 февраля 1996 г.) наблюдается на фоне отрицательной бухты, которая, согласно критерию [Hsu, McPherron, 2007], может быть идентифицирована как суббури (панель а). На панели б показан пример наблюдения всплесков пульсаций Pi2 (30 августа 1995 г.) в спокойных авроральных условиях. Видно, что в поведении AL-индекса отсутствуют какие-либо интенсивные возмущения и отрицательные бухты, свидетельствующие о развитии суббури.

II. Так же как в работах [Куражковская, Клайн, 2010; 2014], в качестве характеристики перемежаемости серий всплесков Pi2 использовался показатель  $\alpha$ , который мы получили на основе анализа кумулятивной функции распределения амплитуд всплесков A. Амплитуда каждого всплеска Pi2 находилась из выражения  $A = \sqrt{H^2 + D^2}$ , где H и D — максимальные значения меридиональной и азимутальной составляющих магнитного поля. Методика получения кумулятивных функций распределений амплитуд всплесков пульсаций Pi2 и показателей  $\alpha$  состояла из следующих этапов.

1. Объем выборки максимальных значений амплитуд A всплесков Pi2 разбивался на интервалы, равные 1 нТл, затем подсчитывалось число всплесков  $n_i$ , попадающих в i-й интервал, и строились гистограммы  $N=N(A)$ .

2. По исходным распределениям амплитуд всплесков Pi2 были получены кумулятивные функции P распределения амплитуды

$$P(A > A_m) = \int_{A_m}^{\infty} W(A) dA,$$

где  $W(A) = N(A) / \sum_{i=1}^k n_i$ , k — число интервалов,  $A_m$  — наименьшее значение амплитуды всплеска в выборке.

3. Далее проводилась аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией  $P(A) = A^{-\alpha}$  начиная с некоторого порогового значения амплитуды всплесков  $A_0$ , которое выбиралось таким образом, чтобы коэффициент корреляции между экспериментальными данными и степенной функцией был максимальным. Иными словами, хвосты кумулятивных функций распределений амплитуд всплесков Pi2 аппроксимировались степенными функциями, что позволило получить показатель  $\alpha$ .

Здесь необходимо отметить, что в литературе рассматриваются различные виды функций, с помощью которых можно аппроксимировать получен-

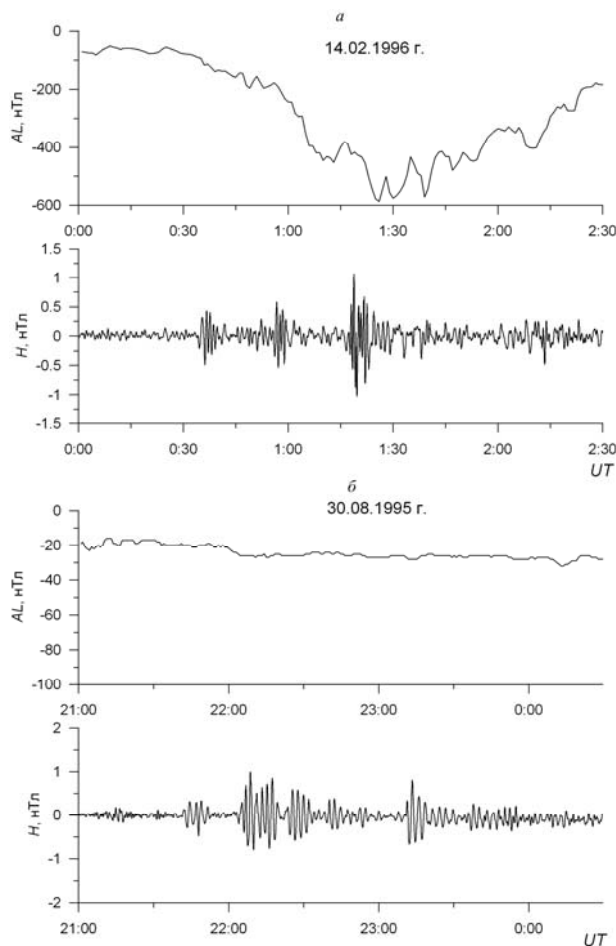


Рис. 1. Примеры динамики  $AL$ -индекса и наблюдения серий всплесков пульсаций  $Pi2$  ( $H$ -компонента) на среднеширотной обсерватории «Борок» во время развития суббури 14 февраля 1996 г. (а), и в период ее отсутствия 30 августа 1995 г. (б)

ные экспериментальные распределения. В частности, наиболее широко используются так называемые канонические физические законы распределения [Sornette, 2000; Писаренко, Родкин, 2007], к которым относятся нормальное, экспоненциальное и степенное распределения. Выбор конкретных функций для аппроксимации эмпирических распределений, вообще говоря, не имеет теоретического обоснования. Однако подход, связанный с применением канонических законов, позволяет проводить аналогии с другими явлениями и интерпретировать полученные результаты. Мы выбрали для аппроксимации кумулятивных функций распределений амплитуд всплесков пульсаций  $Pi2$  степенной закон, исходя из теоретических представлений и численных экспериментов. Как известно, плотность вероятности амплитуд волновых всплесков в плазме характеризуется степенной асимптотикой. Это следует из анализа многих нелинейных моделей, описывающих волновые процессы в плазме, например нелинейного уравнения Шредингера, двумерного и трехмерного обобщений этого уравнения (уравнение Гинзбурга-Ландау), а также уравнения Шредингера со степенной нелинейностью [Малинецкий, Потапов, 2000].

4. Для оценки степени достоверности полученных показателей степени  $\alpha$  были использованы сле-

дующие статистические характеристики: среднеквадратичное отклонение (оно, как правило, не превышало значение 0.08), коэффициент корреляции между степенной функцией и экспериментальными данными (обычно 0.89–0.99), а также верхняя и нижняя границы доверительных интервалов хвостов распределений на уровне 95 % (не более  $\pm 0.25$  от значения  $\alpha$ ).

На рис. 2 в качестве иллюстрации вышеописанной процедуры показано распределение  $N(A)$  амплитуд суббуревых всплесков  $Pi2$ , наблюдаемых в интервале времени 23:00–24:00 MLT. Видно, что количество всплесков плавно убывает с ростом их амплитуд, т. е. распределение амплитуд имеет четко выраженный хвост, не свойственный гауссову распределению. Справа показаны хвост кумулятивной функции  $P(A)$  распределения амплитуд (темные кружки) начиная с некоторого порогового значения  $A_0$  и его аппроксимация степенной функцией. В данном случае величина показателя  $\alpha$  составила 4.5.

Далее будет проведен анализ влияния межпланетных условий на величину и динамику показателей  $\alpha$  суббуревых и несуббуревых серий всплесков пульсаций  $Pi2$ .

Для этого использовалась методика, которая заключалась в следующем. Рассмотрим ее на примере анализа влияния авроральной активности, характеризуемой величиной  $AE$ -индекса, на динамику показателей  $\alpha$  суббуревых и несуббуревых всплесков  $Pi2$ . Диапазоны изменения  $AE$ -индекса, при которых наблюдаются пульсации, относящиеся к двум группам, существенно различаются.

Например, суббуревые серии всплесков  $Pi2$  наблюдаются при  $AE \sim (100-900)$  нТл. Несуббуревые серии всплесков  $Pi2$  наблюдаются в основном при  $AE \sim (50-250)$  нТл. Исходя из этого, диапазоны изме-

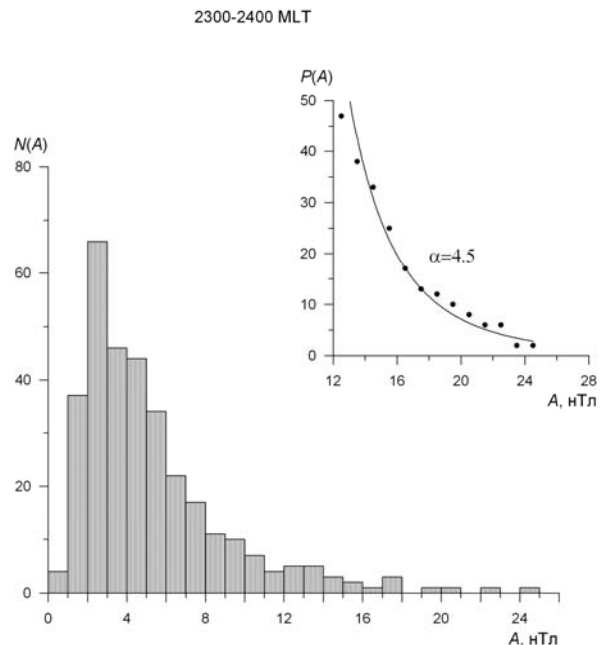


Рис. 2. Распределение амплитуд всплесков  $Pi2$ , наблюдаемых во время развития суббурь в интервале 23:00–24:00 MLT. Справа показана аппроксимация хвоста кумулятивной функции распределения амплитуд всплесков  $Pi2$  (кружки) степенной функцией (сплошная кривая)

нения данного индекса разбивались на бины, ширина которых составляла 50 нТл. В первый бин включались всплески Pi2, которые наблюдались при  $0 < AE < 50$  нТл, во второй — всплески, наблюдавшиеся при  $50 < AE < 100$  нТл и т. д. В результате события первой группы были разбиты на 17 бинов, второй — на 5. Подобным образом суббуревые и несуббуревые всплески Pi2 были разбиты на бины в соответствии с диапазоном изменения параметров солнечного ветра и ММП. В зависимости от величины анализируемого параметра размер и количество бинов были разными. Затем амплитуды суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2, попавших в каждый отдельный бин, анализировались по процедуре, изложенной в разделе 2, которая позволяла получить значения показателей  $\alpha$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### 1. Связь перемежаемости всплесков пульсаций Pi2 с геомагнитной активностью

При исследовании влияния геомагнитной активности на закономерности перемежаемости суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2 использовались  $K_p$ -,  $AE$ - и  $D_{st}$ -индексы, которые характеризуют соответственно планетарную геомагнитную активность, мощность суббурь и интенсивность кольцевого тока во время магнитных бурь.

На рис. 3 показаны зависимости показателей  $\alpha$  от величины  $K_p$ -,  $AE$ - и  $D_{st}$ -индексов для двух групп всплесков Pi2. Видно, что полученные зависимости  $\alpha(K_p)$ ,  $\alpha(AE)$  и  $\alpha(D_{st})$  существенно различаются для суббуревых и несуббуревых серий всплесков Pi2 и имеют нелинейный характер. Заметим, что величина  $K_p$ -индекса выбиралась так, как принято в OMNI2 данных, т. е.  $3+ = 33$ ,  $6- = 57$ ,  $40 = 40$  и т. д. Показатель  $\alpha$  суббуревых всплесков Pi2 первоначально возрастает с увеличением  $K_p$ -индекса до достижения  $K_p \sim 25$ .

Дальнейшее возрастание планетарной геомагнитной активности приводит к плавному уменьшению  $\alpha$  (рис. 3, а). Показатель  $\alpha$  несуббуревых всплесков Pi2 практически не зависит от  $K_p$ -индекса (рис. 3, а).

Согласно рис. 3, б, во время развития суббурь на ночной стороне магнитосферы зависимость  $\alpha(AE)$  имеет явно нелинейный характер. Первоначально виден небольшой рост показателя  $\alpha$  при увеличении  $AE$ -индекса от 50 до 500 нТл. При дальнейшем увеличении  $AE$ -индекса показатель  $\alpha$  уменьшается практически в два раза. В отсутствие суббурь увеличение  $AE$ -индекса приводит к уменьшению показателя  $\alpha$ , т. е. зависимость  $\alpha(AE)$  близка линейной (рис. 3, б).

Зависимости  $\alpha(D_{st})$  суббуревых и несуббуревых серий всплесков Pi2 подобны. С увеличением модуля отрицательных значений  $D_{st}$ -индекса величина показателя  $\alpha$  возрастает (рис. 3, в). Таким образом, динамика показателя  $\alpha$  всплесков Pi2 во время суббурь зависит от степени возмущенности геомагнитного поля в средних, авроральных и экваториальных широтах. В отсутствие суббурь планетарная магнитная активность не оказывает никакого влияния на перемежаемость пульсаций Pi2.

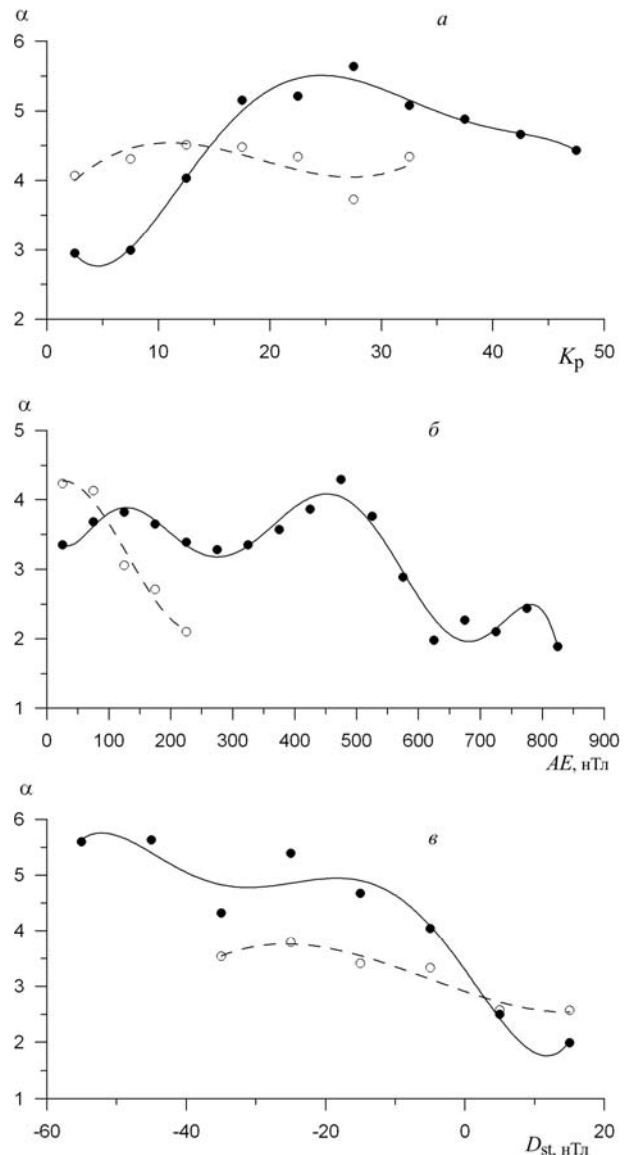


Рис. 3. Зависимости показателя  $\alpha$  от величины  $K_p$ -,  $AE$ - и  $D_{st}$ -индексов (а–в) для случаев наблюдения суббуревых (темные кружки) и несуббуревых (светлые кружки) всплесков пульсаций Pi2. Аппроксимация экспериментальных данных ортогональными полиномами показана сплошной и штриховой кривыми для суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2 соответственно

### 2. Связь перемежаемости всплесков пульсаций Pi2 с параметрами плазмы солнечного ветра и ММП

Ранее в работе [Куражковская, Клайн, 2014] достаточно подробно были исследованы условия межпланетной среды, наиболее благоприятные для возбуждения суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2. Согласно результатам этой работы, частота наблюдения суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2 существенно зависит от полярности ММП и  $E_y$ -компоненты электрического поля солнечного ветра. Более того, было показано, что динамика показателя перемежаемости  $\alpha$  суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2 связана с изменениями  $E_y$ -компоненты электрического поля солнечного ветра и азимутального угла  $\phi$ .

Здесь мы рассмотрим влияние на закономерности перемежаемости двух групп Pi2 других параметров плазмы солнечного ветра и ММП, таких как скорость  $V$ , концентрация  $n$ , динамическое давление солнечного ветра  $P_d$ , модуль напряженности  $B$ ,  $B_x$ -,  $B_y$ -,  $B_z$ -компоненты ММП (в солнечно-эклиптической системе координат). На рис. 4 представлены зависимости  $\alpha(V)$ ,  $\alpha(n)$  и  $\alpha(P_d)$  во время развития суббурь и в их отсутствие. Видно, что характер связи показателя  $\alpha$  с  $V$ ,  $n$  и  $P_d$  суббуревых и несуббуревых всплесков существенно различается. Это свидетельствует о том, что влияние параметров плазмы солнечного ветра на свойства перемежаемости пульсаций Pi2 различно во время суббурь и в их отсутствие. Показатель  $\alpha$  возрастает с увеличением  $V$ , тогда как для несуббуревых Pi2  $\alpha$  не зависит от  $V$  (рис. 4, а). Характерно, что во время развития суббурь возрастание  $V$  до некоторого критического значения  $\sim 500$  км/с первоначально приводит к увеличению показателя  $\alpha$ , а последующий рост  $V$  не способствует возрастанию  $\alpha$ .

Динамика показателя  $\alpha$  суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2 в зависимости от плотности солнечного ветра практически подобна. Из рис. 4, б видно, что с увеличением  $n$  показатель  $\alpha$  обеих групп плавно уменьшается.

Показатель  $\alpha$  суббуревых всплесков первоначально растет при увеличении динамического давления до значения  $\sim 3$  нПа. Дальнейшее увеличение  $P_d$  приводит к уменьшению  $\alpha$  примерно в два раза (рис. 4, в). Для несуббуревых всплесков характерно постепенное уменьшение  $\alpha$  с возрастанием  $P_d$  также до  $\sim 3$  нПа. Далее рост  $P_d$  не влияет на изменение  $\alpha$ . Можно отметить, что зависимости  $\alpha(V)$ ,  $\alpha(n)$  и  $\alpha(P_d)$  во время развития суббурь имеют явно нелинейный характер, также нелинейными являются зависимости  $\alpha(n)$  и  $\alpha(P_d)$  в отсутствие суббурь на ночной стороне магнитосферы.

На рис. 5 показаны зависимости показателей перемежаемости суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2 от  $B$ ,  $B_x$ -,  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП. Характерной особенностью являются значения  $\alpha$ , более высокие во время развития суббурь, чем в их отсутствие. Зависимости  $\alpha(B)$ ,  $\alpha(B_x)$ ,  $\alpha(B_y)$  и  $\alpha(B_z)$  суббуревых и несуббуревых пульсаций Pi2 являются нелинейными. Показатель  $\alpha$  увеличивается с ростом модуля напряженности ММП. При достижении  $B$  некоторого критического значения  $\sim 6$  нТл  $\alpha$  начинает уменьшаться (рис. 5, а). Эта закономерность в динамике  $\alpha$  проявляется во время наблюдения как суббуревых, так и несуббуревых всплесков Pi2. Динамика показателя  $\alpha$  суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2 в зависимости от  $B_x$ -компоненты ММП существенно различается. Для суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2 показатели  $\alpha(B_x)$  изменяются в противофазе. Во время суббурь поведение  $\alpha(B_x)$ ,  $\alpha(B_y)$  и  $\alpha(B_z)$  подобно. В отсутствие суббурь  $\alpha$  возрастает при увеличении модуля отрицательных и положительных значений  $B_x$ -компоненты (рис. 5, б). Показатель  $\alpha$  двух групп Pi2 в зависимости от  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент возрастает при уменьшении положительных значений (рис. 5 в, г). При увеличении модуля отрицательных

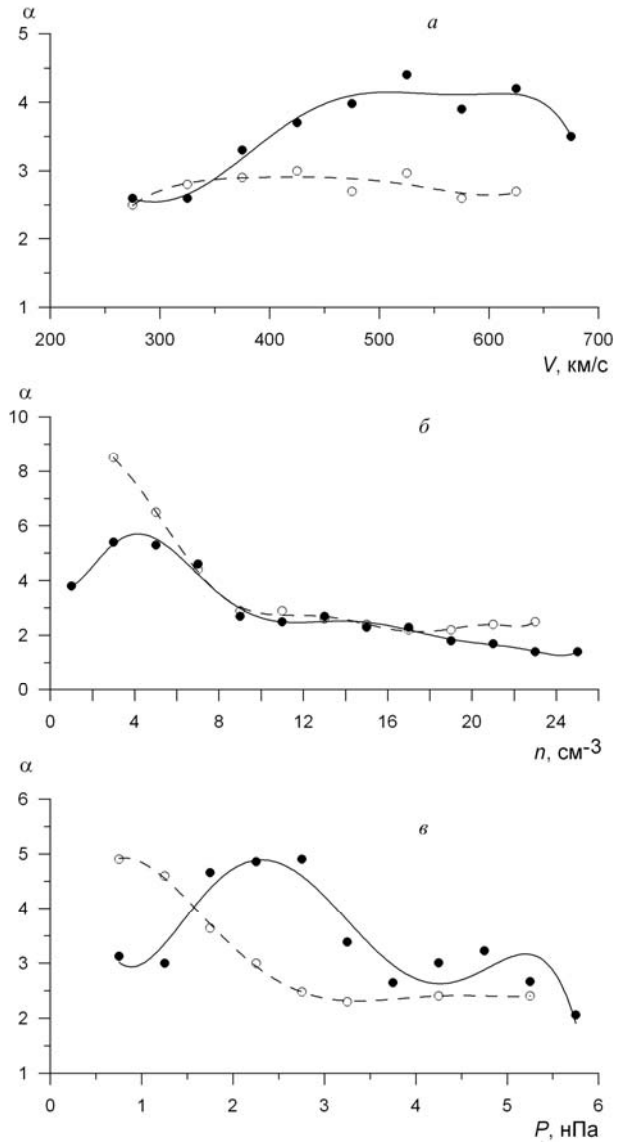


Рис. 4. Зависимость показателя  $\alpha$  от скорости  $V$ , плотности  $n$  и динамического давления  $P_d$  солнечного ветра. Обозначения те же, что на рис. 3

значений  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП показатель  $\alpha$  суббуревых и несуббуревых Pi2 уменьшается. Таким образом, параметры ММП, за исключением  $B_x$ -компоненты, одинаковым образом влияют на перемежаемость пульсаций Pi2 во время развития суббурь и в условиях спокойной магнитосферы.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку всплесковые режимы суббуревых и несуббуревых пульсаций Pi2 наблюдаются в ночном секторе магнитосферы, областью их возбуждения, скорее всего, является хвост магнитосферы. Плазма хвоста магнитосферы, видимо, является той средой, в которой возбуждаются пульсации Pi2 во время развития суббурь и в их отсутствие. Многие теоретические и экспериментальные исследования, а также спутниковые наблюдения показывают присутствие плазменной и МГД-турбулентности в хвосте магнитосферы как на больших [Zimbaro et al., 2003;

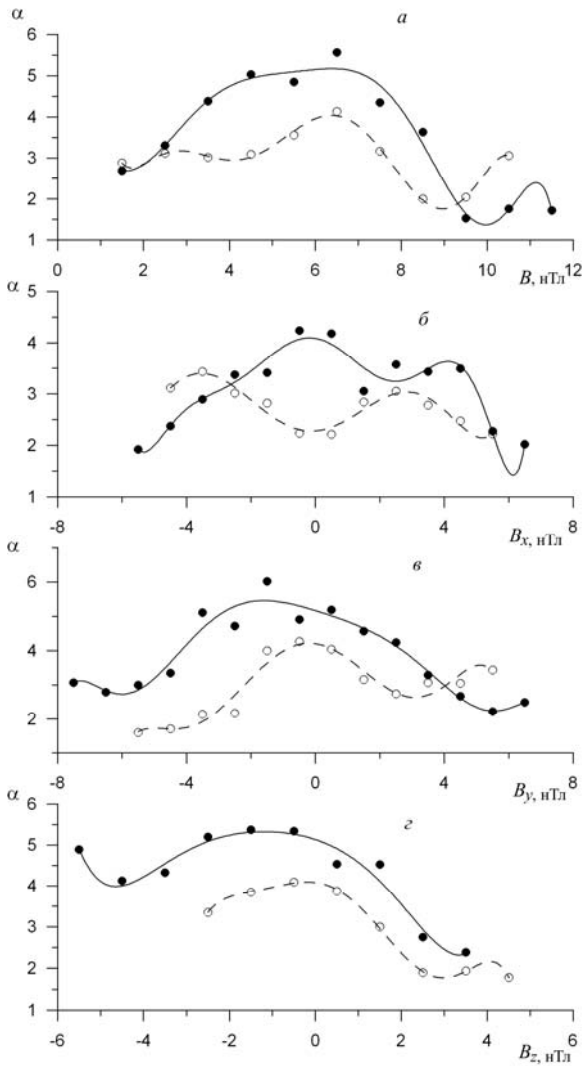


Рис. 5. Зависимости показателя  $\alpha$  от модуля  $V$ ,  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$ -компонент ММП. Обозначения те же, что на рис. 3

Зеленый, Милованов, 2004], так и на малых [Stepanova et al., 2011; Stepanova and Antonova, 2015] геоцентрических расстояниях. В работе [Zimbaro et al., 2003] отмечается, что турбулентность плазмы хвоста сильнее выражена во время высокой геомагнитной активности. Однако и при низкой активности плазма магнитосферного хвоста также турбулизована. Анализ характера распределений амплитуд суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2 по наземным наблюдениям подтверждает, что турбулентность присутствует в хвосте как во время развития суббури, так и в их отсутствие.

Солнечный ветер также имеет турбулентный характер [Borovsky, Funsten, 2003; Parkinson, 2007], и его влияние на формирование магнитосферных возмущений очень велико. Тот факт, что величина показателя  $\alpha$  всплесков Pi2 существенно зависит от параметров плазмы солнечного ветра и ММП, свидетельствует о влиянии внешних факторов на уровень турбулентности плазмы хвоста магнитосферы. В зависимости от энергии, поступающей из солнечного ветра в ночную магнитосферу, изменяются показатели перемежаемости пульсаций Pi2 и соответственно турбулентность среды, в которой они возникают.

Используя полученные зависимости показателей перемежаемости  $\alpha$  пульсаций Pi2 от параметров плазмы солнечного ветра и ММП, можно по наземным данным качественно оценить динамику турбулентности хвоста в спокойном и возмущенном состояниях. Тенденцию изменения уровня плазменной турбулентности в зависимости от планетарной и авроральной активности, а также от интенсивности магнитосферных токов наглядно иллюстрирует рис. 3. Основываясь на результатах, показанных на рис. 4, можно предположить, что во время развития суббури увеличение скорости солнечного ветра приводит к росту плазменной турбулентности хвоста магнитосферы. В условиях невозмущенной магнитосферы зависимость степени турбулентности хвоста от скорости практически отсутствует. Влияние плотности плазмы межпланетной среды на уровень турбулентности хвоста оказывается обратным. Как во время суббури, так и в их отсутствие возрастание  $n$  снижает турбулентность.

Очевидно, наибольший интерес представляет оценка влияния на турбулентность хвоста наиболее геоэффективного параметра — динамического давления. Судя по динамике показателя  $\alpha$  суббуревых и несуббуревых пульсаций Pi2,  $P_d$  влияет на уровень турбулентности плазмы хвоста возмущенной и невозмущенной магнитосферы различным образом. Когда суббури отсутствуют на ночной стороне, увеличение  $P_d$  до  $\sim 3$  нПа приводит к плавному уменьшению уровня турбулентности плазмы хвоста. При дальнейшем увеличении  $P_d$  ( $P_d > 3$  нПа) практически неизменная величина показателя  $\alpha$  свидетельствует о стабилизации уровня турбулентности плазмы хвоста магнитосферы. Совершенно другая тенденция наблюдается во время развития суббури. Видно, что показатель  $\alpha$  выходит на насыщение при достижении  $P_d$  значения 3 нПа, которое можно считать пороговым (рис. 4, в). Можно предположить, что при  $P_d = 3$  нПа турбулентность плазмы хвоста относительно высока. При  $P_d < 3$  нПа и  $P_d > 3$  нПа уровень турбулентности значительно уменьшается. Видимо, сжатие магнитосферы до определенного порогового значения  $P_d$  способствует повышению степени турбулентности хвоста.

Другой группой факторов, влияющих на уровень турбулентности хвоста магнитосферы, может быть величина и ориентация ММП. Исходя из зависимости  $\alpha(B)$  можно предположить, что турбулентность хвоста увеличивается с возрастанием модуля  $B$  до определенного значения  $\sim 6$  нТл. Дальнейшее увеличение  $B$  приводит к уменьшению уровня турбулентности. Также можно выделить некоторые критические значения  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП  $\sim (-2)$  нТл, до достижения которых наблюдается возрастание степени турбулентности хвоста, а затем дальнейшее увеличение модуля отрицательных значений этих компонент приводит к уменьшению степени турбулентности.

Таким образом, анализ динамики показателей  $\alpha$  (рис. 3–5) позволяет выделить некоторые критические значения AE-индекса,  $V$ ,  $P_d$ ,  $B$ ,  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП, при достижении которых увеличивающаяся

турбулентность плазмы хвоста магнитосферы во время развития суббурь начинает уменьшаться. Так, уровень турбулентности плазмы хвоста нарастает при увеличении  $AE$ -индекса,  $V$ ,  $P_d$ ,  $B$ ,  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент до значений  $\sim 500$  нТл,  $\sim 500$  км/с,  $\sim 3$  нПа,  $\sim 6$  нТл,  $-2$  нТл,  $-2$  нТл соответственно. При переходе этих параметров через критические значения нарастающая турбулентность хвоста начинает снижаться. В отсутствие суббурь наблюдается постепенное уменьшение степени турбулентности с ростом  $AE$ -,  $D_{st}$ -индексов,  $n$  и  $P_d$ .

В настоящее время в литературе обсуждается несколько различных сценариев возбуждения и распространения геомагнитных пульсаций Pi2, наблюдаемых во время развития суббурь, а также в их отсутствие [Hsu, McPherron, 2007; Cheng et al., 2009; Keiling, 2011]. В качестве источников суббуревых всплесков Pi2 рассматривают флуктуации ионосферного электроджета в фазе развития суббурь, пульсирующие потоки (bursty bulk flows, BBFs) в плазменном слое хвоста магнитосферы, альвеновские резонансы магнитной силовой линии, поверхностные волны на магнитопаузе и другие. Несуббуревые пульсации Pi2 связывают с интенсификацией приполюсной границы (poleward boundary intensifications, PBIs) и вариациями ММП. Несмотря на многолетнюю историю исследования пульсаций Pi2, вопрос о механизме генерации пульсаций Pi2 по-прежнему продолжает оставаться актуальным и дискуссионным.

Исходя из полученных результатов, трудно дать однозначную интерпретацию механизмов возбуждения пульсаций Pi2 двух рассмотренных групп. Тем не менее мы можем сказать, что любой из известных сценариев возникновения как суббуревых, так и несуббуревых пульсаций Pi2 реализуется в высокотурбулизованной среде. Об этом свидетельствуют значения  $\alpha \gg 1$ . Полученные в данной работе закономерности перемежаемости суббуревых и несуббуревых серий всплесков пульсаций Pi2 могут быть полезны для дальнейшего анализа механизмов их возникновения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что перемежаемость суббуревых и несуббуревых всплесков пульсаций Pi2, характеризующая показателем  $\alpha$ , и степень турбулентности хвоста магнитосферы зависят от геомагнитной активности, параметров солнечного ветра и ММП. Серии всплесков геомагнитных пульсаций Pi2, наблюдаемые во время суббурь и в их отсутствие, всегда возбуждаются в высокотурбулизованной среде. В качестве такой среды рассматривается плазма хвоста магнитосферы, турбулентность которого изменяется под действием внешних факторов. Полученные зависимости  $\alpha(K_p)$ ,  $\alpha(AE)$ ,  $\alpha(D_{st})$ ,  $\alpha(V)$ ,  $\alpha(n)$ ,  $\alpha(P_d)$  и  $\alpha(B_x)$  для суббуревых и несуббуревых всплесков Pi2 имеют различный характер. Зависимости  $\alpha(B)$ ,  $\alpha(B_y)$  и  $\alpha(B_z)$  суббуревых и несуббуревых Pi2 подобны.

Выделены некоторые критические значения  $AE$ -индекса,  $V$ ,  $P_d$ ,  $B$ ,  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП, при достижении которых турбулентность плазмы хвоста магнитосферы во время развития суббурь начинает

уменьшаться. Так, уровень турбулентности плазмы хвоста нарастает при увеличении  $AE$ -индекса,  $V$ ,  $P_d$ ,  $B$ ,  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент до значений  $\sim 500$  нТл,  $\sim 500$  км/с,  $\sim 3$  нПа,  $\sim 6$  нТл,  $-2$  нТл,  $-2$  нТл соответственно. При переходе этих параметров через критические значения нарастающая турбулентность хвоста начинает снижаться. В отсутствие суббурь наблюдается постепенное уменьшение степени турбулентности с ростом  $AE$ -,  $D_{st}$ -индексов,  $n$  и  $P_d$ .

Таким образом, по наземным наблюдениям геомагнитных пульсаций Pi2, используя зависимости  $\alpha(V)$ ,  $\alpha(n)$ ,  $\alpha(P_d)$ ,  $\alpha(B)$ ,  $\alpha(B_x)$ ,  $\alpha(B_y)$  и  $\alpha(B_z)$ , можно качественно оценить уровень турбулентности плазмы хвоста магнитосферы и проследить тенденции его изменения в зависимости от условий межпланетной среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арыков А.А., Мальцев Ю.П., Головчанская И.В. Статистическое изучение поведения параметров солнечного ветра во время суббурь // Геомагнетизм и аэронавтика. 2002. Т. 42, № 2. С. 163–168.
- Берже П., Помо И., Видал К. Порядок в хаосе. М.: Мир, 1991. 368 с.
- Бородкова Н.Л. Воздействие больших и резких изменений динамического давления солнечного ветра на магнитосферу Земли: анализ нескольких событий // Космические иссл. 2010. Т. 48, № 1. С. 43–57. DOI: 10.1134/S001095251001003X.
- Зеленый Л.М., Милованов А.В. Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики // Успехи физических наук. 2004. Т. 174, № 8. С. 809–852.
- Клайн Б.И., Куражковская Н.А., Зотов О.Д. Исследование амплитудных закономерностей высокоширотных магнитных импульсов // Солнечно-земная физика. 2007. Вып. 10. С. 81–88.
- Клайн Б.И., Куражковская Н.А., Куражковский А.Ю. Перемежаемость в волновых процессах // Физика Земли. 2008. № 10. С. 25–34. DOI: 10.1134/S1069351308100054.
- Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Всплесковые режимы длиннопериодных иррегулярных пульсаций в диапазоне частот 2.0–6.0 мГц и суббуревая активность на ночной стороне магнитосферы // Геомагнетизм и аэронавтика. 2009. Т. 49, № 4. С. 483–493. DOI: 10.1134/S0016793209040057.
- Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Перемежаемость в среднеширотных пульсациях Pi2, наблюдаемых во время магнитосферных суббурь и в их отсутствие // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 15. С. 58–65.
- Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Некоторые особенности характеристик среднеширотных суббуревых и несуббуревых геомагнитных пульсаций Pi2 и условий их возбуждения // Геомагнетизм и аэронавтика. 2014. Т. 54, № 1. С. 43–54. DOI: 10.1134/S0016793214010071.
- Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 336 с.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф. М.: Геос, 2007. 242 с.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Часть II. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. 271 с.
- Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н. Перемежаемость флуктуаций плотности солнечного ветра и ее связь с резкими скачками плотности // Космические иссл. 2008. Т. 46, № 1. С. 3–9.
- Akasofu S.I., Chapman S., Meng C.I. The polar electrojet // J. Atmos. Terr. Phys. 1965. V. 27. P. 1275–1305.



Arnoldy R.L. Signature for the interplanetary medium for substorms // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76, N 22. P. 5189–5201.

Borovsky J.E., Funsten H.O. Role of solar wind turbulence in the coupling of the solar wind to the Earth's magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N A6. 1246. DOI: 10.1029/2002JA009601.

Cheng C.-C., Russell C.T. Shue J.-H. On the association of quiet-time Pi2 pulsations with IMF variations // *Adv. Space Res.* 2009. V. 43, Iss. 7. P. 1118–1129. DOI: 10.1016/j.asr.2008.12.001.

Consolini G., De Michelis P. Local intermittency measure analysis of AE-index: The directly driven and unloading component // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L05101. DOI: 10.1029/2004GL022063.

Dobias P., Wanliss J.A. Intermittency of storms and substorms: Is it related to the critical behaviour? // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 2001–2018.

Hsu T.-S., McPherron R.L. A statistical study of the relation of Pi2 and plasma flows in the tail // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. A05209. DOI: 10.1029/2006JA011782.

Keiling A., Takahashi K. Review of Pi2 models // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 161. P. 63–148. DOI: 10.1007/s11214-011-9818-4.

Kim K.-H., Takahashi K., Lee D.-H., Sutcliffe P.R., Yumoto K. Pi2 pulsations associated with poleward boundary intensifications during the absence of substorms // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A01217. DOI: 10.1029/20043JA010780.

Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I. About the power law of SSC amplitudes distributions // *Geophys. Res. Abstracts. General Assembly European Geosciences Union.* 2008. V. 10. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-01309.

Lui A.T.Y. Multifractal and intermittent nature of substorm-associated magnetic turbulence in the magnetotail // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2001. V. 63. P. 1379–1385.

Manneville P., Pomeau Y. Different ways to turbulence in dissipative dynamical systems // *Physica D.* 1980. V. 1, N 2. P. 219–226.

Olson J.V. Pi2 pulsations and substorm onsets: A review // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N 8. P. 17499–17520.

Parkinson M.L., Healey R.C., Dyson P.L. Solar cycle changes in the geo-effectiveness of small-scale solar wind turbulence measured by Wind and ACE at 1 AU // *Ann. Geophys.* 2007. V. 25. P. 1183–1197.

Rostoker G., Olson V. Pi2 micropulsations as indicators of substorm onsets and intensifications // *J. Geomag. Geoelectr.* 1978. V. 30. P. 135–147.

Saito T. Geomagnetic pulsations // *Space Sci. Rev.* 1969. V. 10. P. 319–412.

Sornette D. *Critical Phenomena in Natural Sciences.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 528 p.

Stepanova M.V., Antonova E.E., Foppiano A.J., Rosenberg T.J. Intermittency in the auroral absorption fluctuations as manifestation of magnetospheric turbulence // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 559–565. DOI: 10.1016/j.asr.2005.04.112.

Stepanova M., Pinto V., Valdivia J.A., Antonova E.E. Spatial distribution of the eddy diffusion coefficients in the plasma sheet during quiet time and substorms from THEMIS satellite data // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A00124. DOI: 10.1029/2010JA015887.

Stepanova M., Antonova E.E. Role of turbulent transport in the evolution of the k distribution functions in the plasma sheet // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. V. 120. P. 3702–3714. DOI: 10.1002/2014JA020684.

Tanskanen E.I. A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993–2003 examined // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A05204. DOI: 10.1029/2008JA013682.

Yordanova E., Balogh A., Noullez A., von Steiger R. Turbulence and intermittency in the heliospheric magnetic field in fast and slow solar wind // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A08101. DOI: 10.1029/2009JA014067.

Zimbaro G., Greco A., Taktakishvili A.L., Veltri P., Zelenyi L.M. Magnetic turbulence and particle dynamics in the Earth's magnetotail // *Ann. Geophys.* 2003. V. 21. P. 1947–1953.

Zotov O.D., Klain B.I., Kurazhkovskaya N.A. Stochastic resonance in the earth's magnetosphere dynamics // *Proc. 7th International Conference "Problems of Geocosmos", St. Petersburg, May 26–30, 2008 / Eds. V.N. Troyan, M. Hayakawa, V.S. Semenov. SPb. 2008. P. 360–364.*

<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>.

<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>.

## REFERENCES

Akasofu S.I., Chapman S., Meng C.I. The polar electrojet. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1965, vol. 27, pp. 1275–1305.

Arnoldy R.L. Signature for the interplanetary medium for substorms. *J. Geophys. Res.* 1971, vol. 76, no. 22, pp. 5189–5201.

Arykov A.A., Maltsev Yu.P., Golovchanskaya I.V. Statistical study of the behavior of solar wind parameters during substorms. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2002, vol. 42, pp. 163–1858 (in Russian).

Berge P., Pomeau Y., Vidal C. *Poryadok v khaose* [Order in Chaos]. Moscow, Mir Publ., 1991. 368 p. (in Russian).

Borodkova N. L. Effect of large and sharp changes of solar wind dynamic pressure on the Earth's magnetosphere: Analysis of several events. *Kosmicheskiye issledovaniya* [Cosmic Research]. 2010, vol. 48, no. 1, pp. 43–57 (in Russian). DOI: 10.1134/S001095251001003X.

Borovsky J.E., Funsten H.O. Role of solar wind turbulence in the coupling of the solar wind to the Earth's magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108 (A6), 1246. DOI: 10.1029/2002JA009601.

Cheng C.-C., Russell C.T. Shue J.-H. On the association of quiet-time Pi2 pulsations with IMF variations. *Adv. Space Res.* 2009, vol. 43, iss. 7, pp. 1118–1129. DOI: 10.1016/j.asr.2008.12.001.

Consolini G., De Michelis P. Local intermittency measure analysis of AE index: The directly driven and unloading component. *Geophys. Res. Lett.* 2005, vol. 32, L05101. DOI: 10.1029/2004GL022063.

Dobias P., Wanliss J.A. Intermittency of storms and substorms: Is it related to the critical behaviour? *Ann. Geophys.* 2009, vol. 27. pp. 2001–2018.

Hsu T.-S., McPherron R.L. A statistical study of the relation of Pi2 and plasma flows in the tail. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A05209. DOI: 10.1029/2006JA011782.

Keiling A., Takahashi K. Review of Pi2 models. *Space Sci. Rev.* 2011, vol. 161, pp. 63–148. DOI: 10.1007/s11214-011-9818-4.

Kim K.-H., Takahashi K., Lee D.-H., Sutcliffe P.R., Yumoto K. Pi2 pulsations associated with poleward boundary intensifications during the absence of substorms. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A01217. DOI: 10.1029/20043JA010780.

Klain B.I., Kurazhkovskaya N.A., Zotov O.D. Investigation of the amplitude features of high-latitude magnetic impulse events. *Solnechno-Zemnaya Fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2007, no. 10, pp. 81–88 (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). DOI: 10.1134/S1069351308100054.

Kurazhkovskaya N.A., Klain, B.I. About the power law of SSC amplitudes distributions. *Geophys. Res. Abstracts. General Assembly European Geosciences Union.* 2008, vol. 10. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-01309.

Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I. Burst regimes of long-period irregular pulsations at frequencies of 2.0–6.0 mHz and substorm activity in the nightside magnetosphere. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2009, vol. 49, no. 4, pp. 483–493 (in Russian). DOI: 10.1134/S0016793209040057.

Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I. Intermittence in midlatitude Pi2 pulsations observed during magnetospheric substorms and in the absence of these phenomena. *Solnechno-Zemnaya Fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2010, no. 15, pp. 58–65 (in Russian).

Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I. Specific features of the characteristics of midlatitude substorm and nonsubstorm Pi2 geomagnetic pulsations and their generation conditions. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2014, vol. 54, no. 1, pp. 43–54 (in Russian). DOI: 10.1134/S0016793214010071.

Lui A.T.Y. Multifractal and intermittent nature of substorm-associated magnetic turbulence in the magnetotail. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2001, vol. 63, pp. 1379–1385.

Malinetsky G.G., Potapov A.B. *Sovremennyye problemy nelineinoy dinamiki* [Modern Problems of the Nonlinear Dynamics]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2000. 336 p.

Manneville P., Pomeau Y. Different ways to turbulence in dissipative dynamical systems. *Physica D*. 1980, vol. 1, no. 2, pp. 219–226.

Olson J.V. Pi2 pulsations and substorm onsets: A review. *J. Geophys. Res.* 1999, vol. 104, no. 8, pp. 17499–17520.

Parkinson M.L., Healey R.C., Dyson P.L. Solar cycle changes in the geo-effectiveness of small-scale solar wind turbulence measured by Wind and ACE at 1 AU. *Ann. Geophys.* 2007, vol. 25, pp. 1183–1197.

Pisarenko V.F., Rodkin M.V. *Raspredeleniya s tyazhelyimi khvostami: Prilozhenie k analizu katastrof* [Heavy Tail Distributions: Application to the Catastrophe Analysis]. Moscow, GEOS Publ., 2007. 242 p.

Pudovkin M.I., Raspopov O.M., Kleimenova N.G. *Vozmushcheniya elektromagnitnogo polya Zemli. Chast' II. Korotkoperiodicheskie kolebaniya geomagnitnogo polya* [Disturbances of the Earth's Electromagnetic Field. Part 2. Short-Period Geomagnetic Field Oscillations]. Leningrad, Leningr. Gos. Univ. Publ., 1976. 271 p.

Riazantseva M.O., Zastenker G.N. Intermittency of solar wind density fluctuations and its relation to sharp density changes. *Kosmicheskiye issledovaniya* [Cosmic Research]. 2008, vol. 46, no. 1, pp. 3–9 (in Russian).

Rostoker G., Olson V. Pi2 micropulsations as indicators of substorm onsets and intensifications. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1978, vol. 30, pp. 135–147.

Saito T. Geomagnetic pulsations. *Space Sci. Rev.* 1969, vol. 10, pp. 319–412.

Sornette D. *Critical Phenomena in Natural Sciences*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. 528 p.

Stepanova M.V., Antonova E.E., Foppiano A.J., Rosenberg T.J. Intermittency in the auroral absorption fluctuations as manifestation of magnetospheric turbulence. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, pp. 559–565. DOI: 10.1016/j.asr.2005.04.112.

Stepanova M., Pinto V., Valdivia J.A., Antonova E.E. Spatial distribution of the eddy diffusion coefficients in the plasma sheet during quiet time and substorms from THEMIS satellite data. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A00124. DOI: 10.1029/2010JA015887.

Stepanova M., Antonova E. E. Role of turbulent transport in the evolution of the k distribution functions in the plasma sheet. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 3702–3714. DOI: 10.1002/2014JA020684.

Tanskanen E. I. A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993–2003 examined. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A05204. DOI: 10.1029/2008JA013682.

Yordanova E., Balogh A., Noullez A., von Steiger R. Turbulence and intermittency in the heliospheric magnetic field in fast and slow solar wind. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A08101. DOI: 10.1029/2009JA014067.

Zelenyi L.M., Milovanov A.V. Fractal topology and strange kinetics: From percolation theory to problems in cosmic electrodynamics. *Uspekhi Fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)]. 2004, vol. 47, iss. 8, pp. 809–852 (in Russian).

Zimbardo G., Greco A., Taktakishvili A.L., Veltri P., Zelenyi L.M. Magnetic turbulence and particle dynamics in the Earth's magnetotail. *Ann. Geophys.* 2003, vol. 21, pp. 1947–1953.

Zotov O.D., Klain B.I., Kurazhkovskaya N.A. Stochastic resonance in the Earth's magnetosphere dynamics. Proc. 7th International Conference “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, May 26–30, 2008, Eds. V.N. Troyan, M. Hayakawa, V.S. Semenov. SPb. 2008, pp. 360–364.

<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>.

<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>.