

УДК 550.385.4

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВСПЛЕСКОВЫХ РЕЖИМОВ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ИРРЕГУЛЯРНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

© 2012 г. Н. А. Куражковская, Б. И. Клайн

Геофизическая обсерватория “Борок” филиал ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок (Ярославская обл.)

e-mail: knady@borok.yar.ru

Поступила в редакцию 06.12.2010 г.

После доработки 30.05.2011 г.

Экспериментально исследована зависимость возбуждения в магнитосфере Земли длиннопериодных иррегулярных пульсаций в диапазоне 2.0–6.0 мГц (серии всплесков пульсаций *ipcl*) от совокупности параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Обнаружено, что всплесковые режимы наблюдаются при скорости и динамическом давлении солнечного ветра, превышающих  $V \sim 320$  км/с и  $P \sim 1$  нПа. Показано, что динамика интенсивности и фрактальной структуры всплесков пульсаций *ipcl* в значительной степени зависят от скорости и магнитного давления плазмы солнечного ветра, соответственно. Анализ связи появления серий всплесков пульсаций *ipcl* с крупномасштабными течениями солнечного ветра и полярными корональными дырами позволил отождествить геоэффективные области на Солнце, которые могут быть источником потоков солнечного ветра и альвеновских волн, способствующих генерации всплесковых режимов. На основе исследованных условий межпланетной среды, благоприятных для возбуждения серий всплесков пульсаций *ipcl*, и обобщения морфологических закономерностей рассмотрены возможные механизмы их генерации. Показано, что наиболее вероятным механизмом генерации всплесковых режимов *ipcl* является механизм, аналогичный ветровой неустойчивости в гидродинамике (механизм Майлса–Филлипса). Неустойчивость Майлса–Филлипса обусловлена различными факторами в потоке солнечного ветра, среди которых турбулентность, пороговое значение скорости и флуктуации давления играют определяющую роль. Именно эти закономерности и характерны для условий генерации всплесковых режимов *ipcl*.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы взаимодействия межпланетного магнитного и геомагнитного поля приводят к переносу потока энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли и возбуждению широкого спектра магнитогидродинамических волн (геомагнитных пульсаций), регистрируемых на земной поверхности [Гульельми и Троицкая, 1973]. В силу топологии геомагнитного поля МГД – волны, наблюдаемые в полярных широтах, являются отражением нестационарных волновых процессов не только на передней границе и во входных слоях магнитосферы, но и процессов, протекающих в удаленных частях (в хвосте) магнитосферы. В связи с этим для понимания физических механизмов действия солнечного ветра на магнитосферу Земли большое значение имеет исследование высокоширотных МГД-волн. Среди существующего разнообразия МГД-волн типичным колебательным процессом области дневного каспа и полярной шапки являются длиннопериодные иррегулярные геомагнитные пульсации *ipcl* (irregular pulsations continuous long period) с периодами от 3 до 15–25 мин [Troitskaya et al., 1973; Большакова и др., 1975; Friis-Christensen et al., 1988; Dunlop

et al., 1992]. Исследование морфологии геомагнитных пульсаций *ipcl* показало, что в этом классе пульсаций можно выделить отдельные виды со специфическими закономерностями и разными механизмами генерации. Так, по данным наблюдений гренландской цепочки обсерваторий пульсации *ipcl* по диапазону периодов и области возбуждения были условно разделены на два вида: *np* (noise pulsations) с периодами  $T \sim 3–8$  мин и *lp* (long period) с квазипериодами  $T \sim 15–25$  мин [Клейменова и др., 1985]. Пульсации *np* наблюдались на геомагнитных широтах  $70–76^\circ$  и их возбуждение могло быть связано с развитием неустойчивостей в области входных слоев дневного сектора магнитосферы. Более длиннопериодные пульсации *lp* наблюдались в области дневного полярного каспа и полярной шапки (на  $\Phi \geq 77–80^\circ$ ) и их генерация скорее обусловлена процессами в переходной области магнитосферы и токовыми системами, связанными с антисолнечной конвекцией плазмы [Клейменова и др., 1985].

Наряду с *np*- и *lp*-пульсациями в области дневного каспа и полярной шапки были обнаружены очень длиннопериодные иррегулярные пульсации – *vlp* (very long period) с характерным диапа-

зоном периодов  $T \sim 20\text{--}40$  мин и преимущественной поляризацией по  $H$ - и  $Z$ -компонентам [Клейменова и др., 1986]. На основании совокупности морфологических особенностей пульсаций —  $\nu/p$  в работе [Куражковская, 1990] было показано, что наиболее вероятным механизмом их генерации являются процессы пересоединения на дневной магнитопаузе. Позднее в работе [Pilipenko et al., 2000] экспериментально обосновано, что  $\nu/p$  пульсации — результат модуляции высокоширотной системы продольных токов (возникающей при пересоединении) длиннопериодными альвеновскими волнами солнечного ветра при благоприятной конфигурации ММП.

В работе [Куражковская и Клайн, 1997] по данным регистрации магнитного поля на Антарктической обсерватории Мирный было обнаружено, что при умеренной геомагнитной активности ( $Kp \sim 2\text{--}3$ ) пульсации  $ipcl$  в диапазоне периодов 3–8 мин наблюдаются в виде последовательности отдельных волновых пакетов (всплесков). Такие всплесковые режимы получили название “серии всплесков пульсаций  $ipcl$ ”. Как было показано в наших предыдущих исследованиях, например, [Куражковская и Клайн, 2003; 2009 и ссылки к ним], время наблюдения всплесковых режимов примерно с 08 до 16 MLT. Максимум частоты появления всплесков на широтах дневного полярного каспа приходится на предполуденные часы (10–12 MLT). Каждая отдельная серия содержит от 3 до 5–7 всплесков с типичной продолжительностью  $\sim 30\text{--}35$  минут. Длительность интервалов между всплесками составляет  $\sim 20\text{--}80$  мин. Амплитуда отдельных всплесков варьирует от 10 до 100 нТл и в некоторых случаях может достигать 200–250 нТл. Всплесковые режимы возникают синхронно в двух полушариях.

Начиная с первых работ по исследованию серий всплесков  $ipcl$  [Куражковская и Клайн, 1997; Клайн и Куражковская, 1998], по настоящее время накоплен значительный объем информации об их морфологических закономерностях [Клайн и Куражковская, 2000; Куражковская и Клайн, 2003, 2009; Клайн и др., 2008]. В частности, исследованы спектральные и поляризационные характеристики, нелинейные свойства серий всплесков пульсаций  $ipcl$ , связь с процессами в ночной магнитосфере. Показано, что серии всплесков пульсаций  $ipcl$  — фрактальные структуры, обладающие свойствами солитонов. Также установлено, что всплесковые режимы  $ipcl$  — перемежающийся процесс, возникающий в турбулизованной среде. В большинстве случаев (более 80% случаев) серии всплесков пульсаций  $ipcl$  в дневном каспе наблюдаются на фоне развития суббурь в ночном секторе аврорального овала [Куражковская и Клайн, 2009].

В литературе рассматривается огромное число сценариев появления геомагнитных пульсаций как в результате относительно простых механизмов генерации, так и более сложных. Согласно современным представлениям, к генерации геомагнитных пульсаций могут приводить прямое проникновение гидромагнитных волн из солнечного ветра, изменчивость параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), нестабильные процессы на магнитопаузе, внезапные сжатия или расширения магнитосферы, возбуждение колебаний на ионосферных высотах в области проекции продольных электрических токов, турбулентность магнитосферной плазмы и другие.

В настоящей работе на основе исследования условий межпланетной среды во время наблюдения всплесковых режимов пульсаций  $ipcl$  и обобщения экспериментальных свойств проанализированы возможные механизмы их генерации. Будет показано, что наиболее вероятным механизмом генерации всплесковых режимов  $ipcl$ , является механизм, аналогичный ветровой неустойчивости в гидродинамике (механизм Майлса—Филлипса).

## 2. ДАННЫЕ

Исходными данными в работе являлись аналоговые записи магнитного поля с разверткой 90 мм/ч в антарктической обс. Мирный ( $\Phi = 76.93^\circ$ ;  $\Lambda = 122.92^\circ$ ) за период 1981–1989 гг., в течение которого отобрано 170 серий всплесков пульсаций  $ipcl$ . Данные о параметрах солнечного ветра и ММП, а также значения  $Kp$ -,  $AE$ -,  $Dst$  — индексов за этот же период взяты из базы данных OMNI 2 (<http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/omniweb/ow.html>). Кроме того, были использованы “Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг.”, (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>), и электронный каталог корональных дыр, ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar\\_data/solar\\_corona/holes/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/solar_corona/holes/)).

## 3. ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ И МЕЖПЛАНЕТНЫЕ УСЛОВИЯ

Вопрос о том, обусловлено ли возбуждение перемежающихся всплесков  $ipcl$  внутренними свойствами магнитосферы или инициировано резкими изменениями каких-либо параметров солнечного ветра и ММП остается открытым. Поэтому прежде чем выяснять физическую природу серий всплесков пульсаций  $ipcl$ , необходимо знать геомагнитную и межпланетную обстановку, при которой они возникают. Ранее было показано, что фрактальная размерность  $d$  серий всплесков  $ipcl$  связана с модулем напряженности  $B$  ММП [Клайн и Куражковская, 1998]. В работе [Куражковская и Клайн, 2003] обнаружено, что тип по-

**Таблица 1.** Характеристики распределений индексов геомагнитной активности для случаев наблюдений серий всплесков *ipcl* и фона

Геомагнитная активность	<i>Kp</i> -индекс		<i>AE</i> -индекс, нТл		<i>Dst</i> -индекс, нТл	
	Сред. зн.	Мед. зн.	Сред. зн.	Мед. зн.	Сред. зн.	Мед. зн.
Во время <i>ipcl</i>	25	23	185	138	-14	-11
Фон 1981–1989 гг.	25	23	235	159	-19	-14

**Таблица 2.** Характеристики распределений параметров солнечного ветра и ММП для случаев наблюдений серий всплесков *ipcl* и фона

Параметр	<i>V</i> , км/с		<i>n</i> , см <sup>-3</sup>		<i>P</i> , нПа		<i>B</i> , нТл		<i>B<sub>x</sub></i> , нТл		<i>B<sub>y</sub></i> , нТл		<i>B<sub>z</sub></i> , нТл	
	сред. зн.	мед. зн.	сред. зн.	мед. зн.	сред. зн.	мед. зн.	сред. зн.	мед. зн.	сред. зн.	мед. зн.	сред. зн.	мед. зн.	сред. зн.	мед. зн.
Во время <i>ipcl</i>	477	467	7.7	6	3.02	2.62	6.2	5.9	0.3	0.8	-0.4	-0.7	0.2	0
Фон 1981–1989 гг.	449	428	7.9	6.2	2.96	2.39	7.7	6.7	0.05	0.1	-0.1	-0.2	0.03	0

**Таблица 3.** Характеристики распределений параметров солнечного ветра и ММП для случаев наблюдений серий всплесков *ipcl* и фона

Параметр	$\theta$ , град.		$\phi$ , град.		$E_y \times 10^{-3}$ , мВ/м		$\beta$		<i>M</i>	
	Сред. зн.	Мед. зн.	Сред. зн.	Мед. зн.	Сред. зн.	Мед. зн.	Сред. зн.	Мед. зн.	Сред. зн.	Мед. зн.
Во время <i>ipcl</i>	2.64	0.9	212.09	202	-0.2	-0.2	2.98	1.86	10.88	9.68
Фон 1981–1989 гг.	0.59	0	205.17	185	-0.1	-0.1	2.41	1.37	9.11	8.0

ляризации всплесков зависит от величины *AE*-индекса и ориентации ММП.

Статистический анализ геомагнитной активности, параметров солнечного ветра и ММП, дающий возможность обнаружить общие типичные черты фона, на котором происходит возбуждение всплесковых режимов, а также выявить геоэффективные параметры солнечного ветра, влияющие на характеристики всплесков, нами ранее не проводился. Здесь мы подробнее остановимся на результатах сравнения параметров межпланетной среды во время наблюдения серий всплесков *ipcl* и окружающего фона. Анализировались две выборки геомагнитных и межпланетных параметров. Одна из них содержала индексы геомагнитной активности, параметры солнечного ветра и ММП для часовых интервалов, когда наблюдались серии всплесков пульсаций *ipcl* на обс. Мирный. Другая выборка (фон) состояла из длительных рядов этих же параметров за все годы (1981–1989 гг.), из которых отбирались пульсации для исследования. При составлении второй выборки мы ограничились интервалом времени (03–14 UT) наиболее вероятного наблюдения всплесковых режимов, в течение которого обсерватория Мирный примерно оказывалась под проекцией дневного участка аврорального овала.

Степень возмущенности геомагнитного поля анализировалась по величинам *Kp*-, *Dst*- и *AE*-индексов, характеризующих планетарную активность; интенсивность кольцевых токов, возникающих в магнитосфере во время магнитных бурь; интенсивность магнитных возмущений в зоне полярных сияний (суббуревая активность), соответственно. В качестве параметров межпланетной среды рассматривались среднечасовые значения скорости *V*, концентрации *n*, динамического давления солнечного ветра  $P = \rho V^2$  ( $\rho$  – плотность плазмы), модуля напряженности *B* ММП, *B<sub>x</sub>*-, *B<sub>y</sub>*-, *B<sub>z</sub>*-компонент ММП. Также проанализирована зависимость вероятности появления всплесков *ipcl* от ориентации вектора ММП (широты  $\theta$  и долготы  $\phi$  вектора *B* ММП в солнечно-эклиптической системе координат), компоненты электрического поля солнечного ветра  $E_y = -VB_z$ , бета параметра  $\beta = [(T \times 4.16/10^5) + 5.34]n/B^2$ , числа Маха  $M = (VN_p^{0.5})/20 \times B$ . Для каждой выборки были построены эмпирические распределения вышеназванных параметров и получены средние и медианные оценки распределений, которые представлены в таблицах 1–3. Сразу заметим, что в работе мы не будем приводить все полученные гистограммы, а лишь остановимся кратко на их описании.

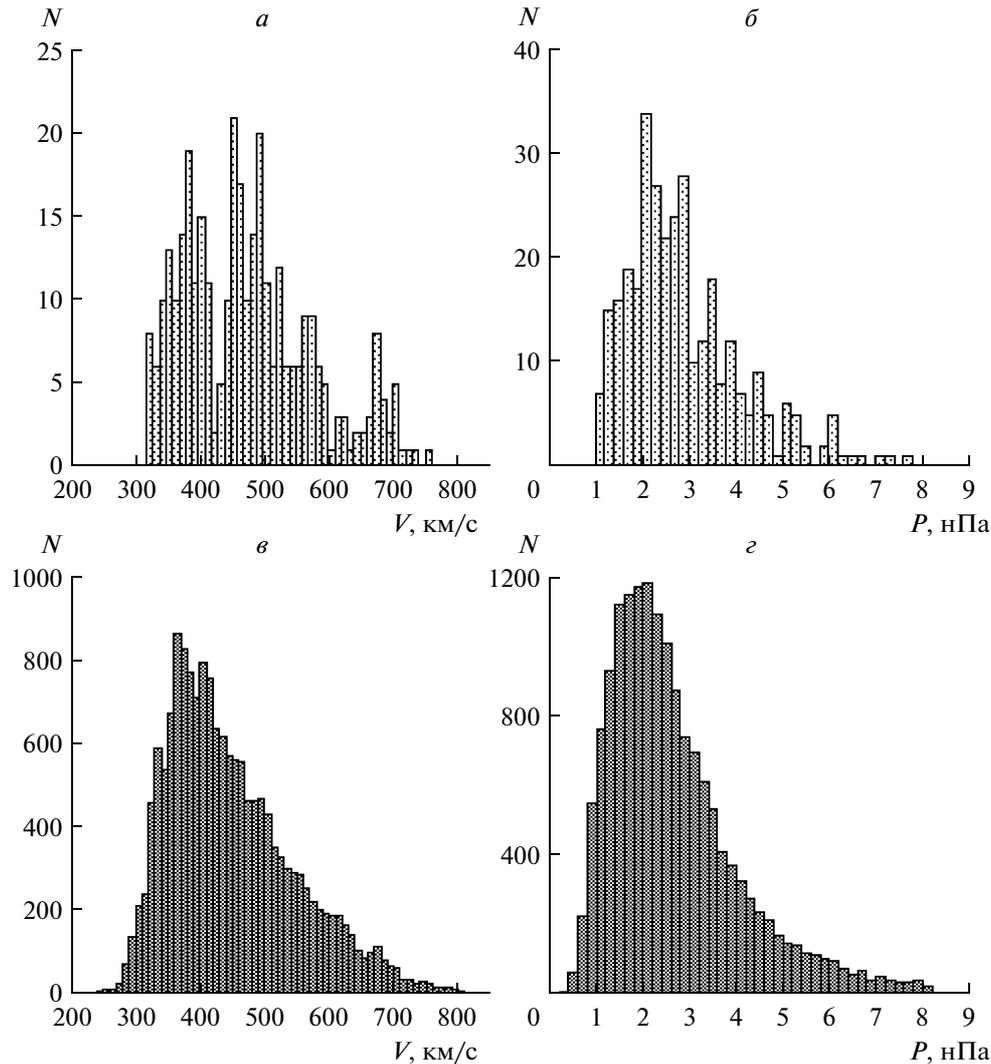


Рис. 1. Распределение скорости  $V$  и динамического давления  $P$  солнечного ветра во время наблюдения серий всплесков пульсаций  $ipcl$  ( $a, б$ ) и фоновые распределения этих же параметров солнечного ветра ( $в, г$ ).

Распределения  $Kp$ -,  $Dst$ - и  $AE$ -индексов обеих выборок имеют вид, типичный для спокойной и умеренно-возмущенной магнитосферы. Формы распределений похожи, их максимумы совпадают, а средние и медианные значения либо одинаковы, либо незначительно различаются. В таблице 1 приведены средние и медианные значения распределений индексов геомагнитной активности для случаев наблюдения серий всплесков  $ipcl$  и фона. Видно, что характеристики распределений  $Kp$ -индекса фона и тех часовых интервалов, когда наблюдаются серии всплесков  $ipcl$ , совпадают, а  $AE$ - и  $Dst$ -индексов во время наблюдения всплесковых режимов на 15–35% меньше, чем для фоновых распределений. Исходя из этого, можно сказать, что генерация всплесковых режимов явным образом не обусловлена высокой планетарной активностью и развитием сильных маг-

нитных возмущений, как на передней границе, так и в хвосте магнитосферы.

Средние и медианные характеристики фоновых распределений и распределений для случаев наблюдения серий всплесков пульсаций  $ipcl$  таких параметров солнечного ветра и ММП, как  $V$ ,  $n$ ,  $P$ ,  $\phi$  (табл. 2, 3) отличаются незначительно (в пределах 2–10%). В связи с этим можно считать, что всплесковые режимы  $ipcl$  наблюдаются при таких же средних параметрах  $V$ ,  $n$ ,  $P$ ,  $\phi$ , которые характерны для окружающего фона. При анализе полученных распределений мы обратили внимание на различие формы распределений  $V$  и  $P$  во время наблюдения серий всплесков пульсаций  $ipcl$  и фона. Так, распределения (рис. 1а, б) имеют общую особенность – резкий передний фронт, в то время как в фоновых распределениях видно плавное нарастание числа случаев по интервалам  $V$  и  $P$

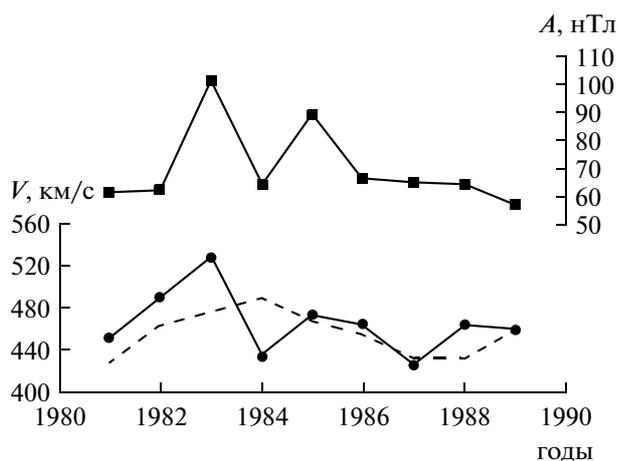


Рис. 2. Среднегодовая динамика максимальной амплитуды всплесков пульсаций *ipcl*  $A$  (квадраты) и скорости солнечного ветра  $V$  (кружки). Пунктирной линией показана вариация фоновой скорости.

(рис. 1*в, г*). Также не совпадают максимумы распределений скоростей. Максимумы частоты появления всплесков пульсаций *ipcl* в зависимости от скорости и фонового распределения скорости приходятся на 450 км/с и 360 км/с, соответственно. Из рис. 1 видно, что генерация всплесковых режимов *ipcl* наблюдается при  $V \geq 320$  км/с и  $P \geq 1$  нПа (рис. 1*а, б*). Фоновые распределения этих же параметров за анализируемый период содержат гораздо меньшие значения скорости и динамического давления  $V < 300$  км/с и  $P < 1$  нПа (рис. 1*в, г*). По нашему мнению, значения скорости  $\sim 320$  км/с и динамического давления солнечного ветра  $\sim 1$  нПа являются критическими для возбуждения всплесковых режимов. Таким образом,  $V$  и  $P$  можно отнести к факторам, от которых зависит появление всплесковых режимов в условиях умеренно — возмущенной магнитосферы. Более того, для возбуждения всплесковых режимов характерен эффект, связанный с переходом величины скорости и динамического давления солнечного ветра через некоторое критическое значение.

В большей степени различие в распределениях двух выборок проявляется для модуля ММП  $B$ ,  $\beta$ ,  $M$  (средние и медианные значения отличаются на 13–35%). Но наиболее сильно отличаются характеристики распределений  $B_x$ -,  $B_y$ -,  $B_z$ -компонент ММП, угла  $\theta$ ,  $E_y$  (табл. 2, 3). Так, во время наблюдения всплесков *ipcl* средние и медианные значения распределений этих параметров в несколько (3–5) раз больше, чем для фоновых распределений. Кроме того, максимумы распределений двух выборок этих параметров, различаются. Это является существенным аргументом в пользу того, что генерация всплесковых режимов зависит от

$E_y$ -компоненты электрического поля солнечного ветра, величины компонент и ориентации ММП.

Далее перейдем к изложению результатов статистического исследования связи основных характеристик всплесковых режимов с динамикой межпланетных параметров. В качестве одной из характеристик серий всплесков пульсаций *ipcl* рассматривались максимальная амплитуда всплесков  $A$ . Амплитуда каждого всплеска  $A$  находилась из выражения:  $A = \sqrt{H^2 + D^2}$ , где  $H$  и  $D$  максимальные значения меридиональной и азимутальной составляющих магнитного поля. Другой интегральной характеристикой всплесковых режимов служила фрактальная размерность  $d$ , отражающая спектральный состав и продолжительность всплесков каждой серии. Для определения фрактальной размерности использовался метод критических экспонент, подробно изложенный в работах [Nakagawa, 1993; Клайн и Куражковская, 1998]. Фрактальная размерность серий всплесков *ipcl* находилась из соотношения:  $d = (5 - \xi)/2$ , где  $\xi$  — показатель спектра мощности. По первоначальным данным  $A$  и  $d$  серий всплесков *ipcl* получены их среднегодовые характеристики.

За период с 1981 по 1989 г. среднечасовые данные параметров солнечного ветра и ММП также были усреднены по годам. Поиски корреляционных связей  $A$  и  $d$  с параметрами солнечного ветра и ММП позволили выявить следующие закономерности. На рисунке 2 приведены среднегодовая динамика максимальной амплитуды всплесков пульсаций *ipcl* и скорости солнечного ветра во время наблюдения всплесковых режимов. Здесь же пунктирной линией показан ход фоновой скорости солнечного ветра за весь анализируемый период. Прежде всего, необходимо заметить, что поведение  $V$  для случаев серий всплесков пульсаций *ipcl* не совпадает с динамикой фоновой скорости солнечного ветра, что свидетельствует о вполне определенном скоростном режиме солнечного ветра для возбуждения всплесковых режимов. Кроме того, из рис. 2 видно, что наблюдается достаточно хорошее подобие между кривыми  $A$  и  $V$  (коэффициент корреляции составляет 0.7). Это говорит о том, что роль скорости солнечного ветра в вариациях амплитуды всплесков *ipcl* очевидна и связь между генерацией всплесковых режимов и скоростью солнечного ветра не является случайной.

На рис. 3 показаны данные среднегодовых значений фрактальной размерности  $d$  серий всплесков *ipcl* и магнитного давления плазмы солнечного ветра  $P_{\text{магн.}} = B^2/8\pi$ . Также пунктирной линией обозначена фоновая динамика  $P_{\text{магн.}}$ . Анализ поведения кривых показал, что между  $d$  и  $P_{\text{магн.}}$  существует корреляционная связь с довольно высоким коэффициентом корреляции, равным 0.89. Следовательно, фрактальная структура всплесковых

режимов существенно зависит от магнитного давления плазмы солнечного ветра. Таким образом, по-видимому, из всех факторов межпланетной среды интенсивностью всплесков управляет скорость солнечного ветра, а фрактальной структурой магнитное давление плазмы солнечного ветра.

Известно, что солнечный ветер имеет сложную структуру и содержит в себе как крупномасштабные, так и мелкомасштабные образования [Ермолаев и др., 2009]. С целью выяснения, на фоне каких крупномасштабных образований солнечного ветра наблюдаются серии всплесков пульсаций *ipcl*, мы провели сопоставление интервалов появления всплесковых режимов с результатами идентификации течений солнечного ветра, представленных на сайте ИКИ РАН (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>). Анализ показал, что 46% и 51% всплесковых режимов *ipcl* наблюдаются на фоне квазистационарного медленного (SLOW) и высокоскоростного (FAST) течений солнечного ветра, соответственно. Граница между медленным SLOW и быстрым FAST течениями условно проведена по величине скорости, равной 450 км/с [Ермолаев и др., 2009]. Действительно серии всплесков пульсаций *ipcl* наблюдаются как при  $V < 450$  км/с, так и при  $V \geq 450$  км/с, что отчетливо видно и из рис. 1а. Энергетические характеристики быстрого и медленного солнечного ветра похожи и их динамическое давление, оказываемое на земную поверхность, примерно одинаково [Филиппов, 2007]. По-видимому, в силу примерно одинаковой геоэффективности FAST и SLOW течений солнечного ветра серии всплесков пульсаций *ipcl* наблюдаются как при быстром, так и медленном солнечном ветре.

Для условий наблюдения серий всплесков пульсаций *ipcl* характерна величина отношения теплового давления к магнитному давлению (бета параметр  $\beta$ ), значительно больше 1 (табл. 3). Значение параметра  $\beta > 1$  является одним из признаков CIR (Corotating Interaction Region) – областей сжатой плазмы на фронте быстрых течений из полярных корональных дыр и медленных течений из корональных стримеров [Ермолаев и др., 2009, (см. рис. 1)]. Здесь уместно отметить, что крупномасштабные течения солнечного ветра имеют характерную продолжительность от одного до нескольких дней, а типичная длительность серий всплесков пульсаций *ipcl* несколько часов. Поскольку серии всплесков пульсаций *ipcl* наблюдаются при  $\beta > 1$  на фоне FAST и SLOW, то можно предположить, что в крупномасштабном FAST и SLOW течениях солнечного ветра существуют более мелкомасштабные образования типа CIR (с признаками крупномасштабных областей сжатой плазмы), которые можно идентифицировать по наземным наблюдениям пульсаций.

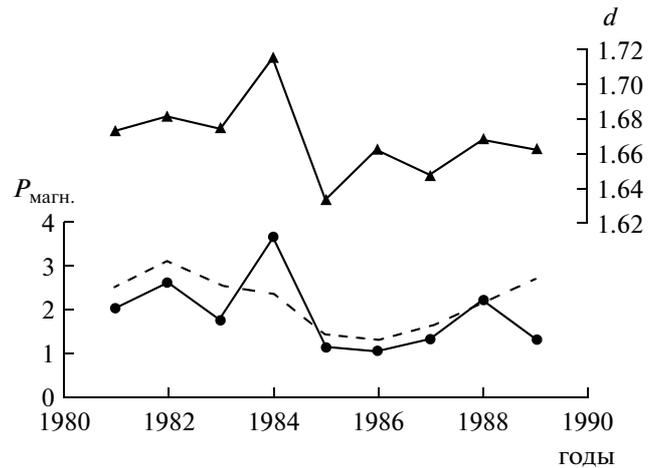
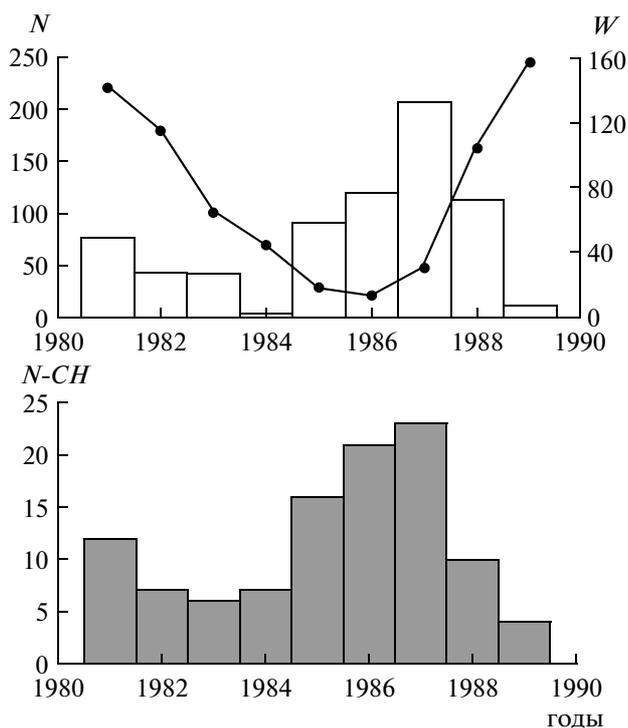


Рис. 3. Вариация среднегодовых значений фрактальной размерности  $d$  серий всплесков *ipcl* (треугольники) и магнитного давления плазмы солнечного ветра  $P_{\text{магн}}$  (кружки). Пунктирной линией показана вариация фонового магнитного давления плазмы солнечного ветра.

Наличие у серий всплесков *ipcl* признаков FAST, SLOW и CIR, позволяет отождествить области на Солнце, которые могут быть ответственны за появление всплесковых режимов. На наш взгляд, должна существовать определенная связь между появлением корональных дыр на Солнце и наблюдением всплесковых режимов длиннопериодных пульсаций на земной поверхности. Действительно, сопоставление среднегодовой частоты появления всплесков с годовой динамикой числа полярных корональных дыр (рис. 4) показало, что между ними существует хорошая корреляция. На рисунке 4 приведена годовая вариация количества обнаруженных за исследуемый период всплесков *ipcl*, числа Вольфа и динамика количества корональных дыр с 1981 по 1989 гг. Видно, что наибольшее количество всплесков *ipcl* наблюдается на фазах спада и подъема солнечного цикла. Аналогичная динамика характерна для числа полярных корональных дыр. Можно предположить, что частотой появления всплесков управляет долговременная вариация числа полярных корональных дыр.

Таким образом, из анализа межпланетных условий следует, что генерация всплесковых режимов *ipcl* тесно связана с потоками солнечного ветра, движущимися с различными скоростями, взаимодействие между которыми приводит к образованию областей сжатия. Согласно [Коваленко, 1983; Прист, 1985] в солнечном ветре постоянно существуют флуктуации магнитного поля, отождествляемые в основном с альвеновскими волнами, распространяющимися от Солнца к земной поверхности. Этот факт, по нашему мне-



**Рис. 4.** Годовая вариация количества всплесков пульсаций *ipcl*  $N$ , чисел Вольфа  $W$  (кружки) и динамика количества полярных корональных дыр  $N-CH$  с 1981 по 1989 гг.

нию, является одним из определяющих при возникновении пульсаций *ipcl*.

#### 4. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ

Прежде чем переходить к анализу возможных механизмов возбуждения серий всплесков пульсаций *ipcl*, отметим, что областью генерации всплесков, скорее всего, является подсолнечная область магнитосферы. Подтверждением последнего служат следующие обнаруженные закономерности серий всплесков пульсаций *ipcl*: 1) суточная вариация частоты появления всплесков с максимумом в полуденные часы [Куражковская и Клайн, 1997]; 2) одновременность наблюдения всплесковых режимов в сопряженных областях [Куражковская и Клайн, 2003]; 3) подобие спектрального состава и корреляционная связь интенсивности всплесков в двух полушариях [Куражковская и Клайн, 2003]; 4) зависимость типа поляризации [Куражковская и Клайн, 2003], фрактальной структуры [Клайн и Куражковская, 1998] и амплитуды всплесков *ipcl* от параметров солнечного ветра и ММП.

Несколько различных механизмов могут приводить к генерации длиннопериодных иррегулярных пульсаций, наблюдаемых в области дневного

полярного каспа. Проанализируем на качественном уровне некоторые из них.

1. В качестве одного из возможных механизмов можно рассмотреть, например, импульсное пересоединение между силовыми линиями ММП и геомагнитного поля. Известно, что необходимым условием развития процессов пересоединения в подсолнечной области магнитосферы является южное направление вертикальной компоненты ММП ( $B_z < 0$ ) [Нишида, 1980]. Как видно из табл. 2, среднее и медианное значения  $B_z$ -компоненты ММП во время наблюдения серий всплесков *ipcl* составляют 0.2 нТл и 0 нТл, соответственно. Также близки к нулю средние и медианные значения фонового распределения  $B_z$ -компоненты. При таких небольших значениях  $B_z$  — компоненты маловероятно развитие процессов пересоединения на передней границе магнитосферы. Кроме того, согласно [Kawano and Russel, 1996] импульсное пересоединение (FTEs — flux transfer events) имеет тенденцию наиболее часто появляться на магнитопаузе в послеполуденном секторе (12–14 MLT). Максимум частоты появления всплесков приходится на предполуденные часы (10–12 MLT), что не совпадает со временем наиболее вероятного наблюдения FTEs.

Одной из характерных особенностей импульсного пересоединения является зависимость его частоты появления от сезона. Так, в работе [Kogotova et al., 2008] обнаружено, что максимум наблюдения FTE соответствует зимнему сезону. Всплесковые режимы *ipcl* наблюдаются преимущественно в сезон равноденствия (рис. 5а) и уровень интенсивности всплесков самый низкий в зимний сезон (рис. 5б, 5–7 месяцы — зима в южном полушарии). Таким образом, сезонные вариации частоты появления FTE и серий всплесков пульсаций *ipcl* принципиально различны.

В работе [Lanzerotti and MacLennan, 1988] показано, что, как правило, низкочастотные геомагнитные пульсации (с периодами ~400 с), возбуждаемые в результате FTE, сопровождаются электромагнитными излучениями в диапазоне частот ~0.01–0.05 Гц. Анализ одновременных магнитных записей серий всплесков *ipcl* и геомагнитных пульсаций в диапазоне частот 0.1–1.0 Гц показал, что во время наблюдения всплесковых режимов отсутствуют электромагнитные излучения высокочастотного диапазона, что является важным отличием серий всплесков пульсаций *ipcl* от волн, возникающих в процессе пересоединения.

Характерные времена процессов импульсного пересоединения в магнитосфере Земли не превышают 3–8 мин и их пространственные масштабы (~1 $R_E$ ) намного меньше размера магнитосферы [Russel and Elphic, 1979; Lanzerotti et al., 1986]. Полагая, что альвеновская скорость в солнечном ветре на границе магнитосферы составляет

~100 км/с, можно определить характерный пространственный размер всплесков и сравнить его с характерным размером магнитосферы (длина последней силовой линии составляет  $\sim 2 \times 10^5$  км). Поскольку продолжительность всплесков составляет 30–35 мин, получаем пространственный размер волнового пакета  $\sim (1.8\text{--}2.1) \times 10^5$  км, что соизмеримо с характерным размером магнитосферы. Таким образом, временные и пространственные характеристики всплесков *ipcl* и ФТЕ также существенно различаются. Совокупность перечисленных особенностей серий всплесков пульсаций *ipcl* и ФТЕ свидетельствует о том, что процессы пересоединения в подсолнечной области магнитосферы вряд ли могут быть потенциальным механизмом генерации всплесковых режимов.

2. Всплесковые режимы наблюдаются в районе полярных каспов, через которые плазма из переходной области проникает внутрь магнитосферы вплоть до ионосферы. Для области полярных каспов магнитосферы характерны специфические системы ионосферных продольных токов, контролируемых динамикой параметров солнечного ветра. В условиях умеренно-возмущенной магнитосферы время появления всплесков (8–16 MLT) формально почти совпадает с преимущественным наблюдением ионосферных токов (9–15 MLT), регистрируемых в южном полярном каспе на широте  $\sim 75\text{--}80^\circ$  [Iijima et al., 1978]. Примерно на этих же широтах оказывается obs. Мирный, где и наблюдаются серии всплесков *ipcl*. Можно было бы предположить, что возбуждение всплесковых режимов происходит в ионосфере и обусловлено флуктуациями токов. Однако для всплесковых режимов характерно поляризационное расщепление всплесков на *L* и *R* волны [Куражковская и Клайн, 2003]. Кроме того, серии всплесков *ipcl*, наблюдаемые в северном и южном полушарии — сопряжены, что свидетельствует об их общем источнике. В связи с вышесказанным флуктуации высокоширотных ионосферных токов, скорее всего, не могут быть источником всплесков.

3. Наблюдение всплесковых режимов *ipcl* в области каспов (на границе между замкнутыми геомагнитными силовыми линиями и магнитными силовыми линиями, уходящими далеко в хвост магнитосферы) указывает на то, что источник их возбуждения мог бы находиться в хвосте магнитосферы. Например, генерация всплесков могла быть связана с дрейфом плазменных неоднородностей из ночного сектора магнитосферы в дневной сектор во время суббури или с проникновением волн, возникающих в результате пересоединения в удаленных частях хвоста, из хвоста в область полярного каспа. Действительно, серии всплесков *ipcl* возникают на фоне развития суббурной активности в ночном секторе магнитосферы и на некоторые их закономерности (характер

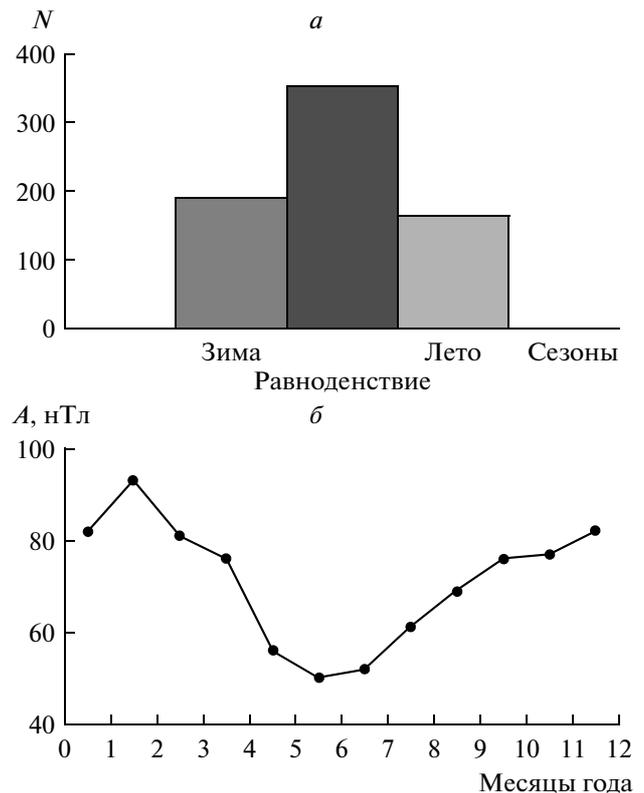


Рис. 5. Зависимость частоты появления всплесков *ipcl* от сезона (а) и сезонная вариация интенсивности всплесков *ipcl* (б).

распределений амплитуд всплесков, суточная вариация, соотношение интенсивности всплесков по компонентам) оказывает влияние факт присутствия или отсутствия суббурь [Куражковская и Клайн, 2009]. Однако время наблюдения серий всплесков *ipcl* (дневные часы) указывает на формирование всплесковых режимов пульсаций в дневном секторе магнитосферы. Существование ряда других аргументов, таких как отсутствие зависимости фрактальной структуры всплесков от величины *AE*-индекса, а также отсутствие связи появления всплесков с какими-либо фазами суббурь [Куражковская и Клайн, 2009], опровергает предположение о возбуждении этих пульсаций за счет процессов пересоединения в хвосте магнитосферы во время суббурь.

4. Вследствие многообразия условий в межпланетной среде на границе магнитосферы и солнечного ветра возникает огромное число неустойчивостей, приводящих к возбуждению МГД-волн. В литературе наиболее часто обсуждаются механизмы возбуждения поверхностных волн на магнитопаузе в результате неустойчивостей Кельвина–Гельмгольца и Рэлея–Тейлора [Mishin, 1993; Farrugia et al., 1998; Гульельми и др., 2010]. Известно, что неустойчивость Кельвина–Гельмгольца развивается при условии, что ско-

рость потока солнечного ветра перед магнитопаузой значительно превосходит 500 км/с [Нишида, 1980; Farrugia et al., 2003]. При  $V < 500$  км/с и  $B_z > 0$  уменьшается толщина входных слоев и таким образом уменьшается инкремент неустойчивости. Возмущения, возникающие в результате развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, преимущественно наблюдаются на флангах магнитосферы и их поляризация изменяется около полудня.

Действительно, для всплесковых режимов *ipcl* характерна смена поляризации вблизи полуденного меридиана [Куражковская и Клайн, 2003]. Примерно 35% всплесков наблюдаются при  $V > 500$  км/с. Видимо, часть всплесковых режимов может быть обусловлена развитием неустойчивости Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе. Однако в большинстве случаев (рис. 1) всплески наблюдаются при небольших скоростях солнечного ветра ( $V < 500$  км/с). Более того, для возбуждения серий всплесков *ipcl* характерен пороговый эффект по скорости и динамическому давлению, что не типично при развитии неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. С нашей точки зрения, неустойчивость Кельвина–Гельмгольца не может быть потенциальным механизмом генерации доминирующей части всплесковых режимов *ipcl*.

Неустойчивость Рэлея–Тейлора возникает в условиях нестационарного обтекания магнитосферы солнечным ветром. По обыкновению, эта неустойчивость обусловлена смещениями магнитопаузы, связанными, например, с импульсными изменениями динамического давления солнечного ветра. Как видно из табл. 2 всплесковые режимы *ipcl* наблюдаются при повышенных значениях динамического давления  $P$  солнечного ветра по сравнению с фоном. Этот факт отмечался ранее в работе [Клайн и Куражковская, 2000], где было показано, что в каждой серии к моменту наблюдения всплеска с максимальной амплитудой  $P$  возрастает. Однако анализ  $P$  за несколько часов до начала всплесковых режимов *ipcl* не выявил резких флуктуаций в динамическом давлении, которые могли бы вызывать смещения магнитопаузы. Также для условий наблюдения серий всплесков *ipcl* (умеренная геомагнитная активность) характерно отсутствие резких флуктуаций каких-либо параметров ММП. Как отмечалось ранее в работе [Куражковская и Клайн, 1997], всплески внутри серии и в целом появление серий никакого отношения не имеют к смене направления ММП. В связи с этим возбуждение серий всплесков *ipcl* вряд ли возможно в результате развития неустойчивости Рэлея–Тейлора на магнитопаузе.

На границе магнитосферы может развиваться еще один тип неустойчивости, аналогичный вихревой сдвиговой неустойчивости Майлса–Филлипса в гидродинамике [Филиппс, 1969; Андронов

и Фабрикант, 1979]. Эта разновидность неустойчивостей относится к резонансному типу, в отечественной литературе ее называют ветровой. Неустойчивость Майлса–Филлипса – нелинейный процесс, который приводит к генерации поверхностных волн параболического типа [Андронов и Фабрикант, 1979]. В работе [Вробель и Конторович, 1982] было замечено, что ветровая неустойчивость может иметь место в магнитосферах Земли и планет. Позднее в работе [Птицына и Гудков, 1991] было показано, что ветровая неустойчивость Майлса–Филлипса может возникнуть при обтекании магнитосферы Земли солнечным ветром и ее развитие определяется характером профиля скорости в пограничном слое. Судя по оценкам авторов работы [Птицына и Гудков, 1991], в результате развития ветровой неустойчивости на границе магнитосферы возможна генерация геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов 15–600 с.

Как известно, эта неустойчивость обусловлена различными факторами в потоке солнечного ветра, среди которых турбулентность обтекающего потока, пороговое значение скорости и пондеромоторные силы, действующие на границе магнитосферы, играют определяющую роль. В отличие от неустойчивости Кельвина–Гельмгольца ветровая неустойчивость приводит к усилению волн при значительно меньших скоростях солнечного ветра. Важным обстоятельством для возникновения ветровой неустойчивости является существование пограничного слоя, в котором скорость солнечного ветра на границе магнитосферы изменяется нелинейным образом. Как было показано в работе [Филиппс, 1969], турбулентность обтекающего потока можно учесть, выбирая соответствующий профиль скорости обтекания.

Фактически речь идет о действии усредненных сил на границе магнитосферы, которые определяют механизм Филлипса. Если быть более точным, действие динамического давления на границу магнитосферы определяется пондеромоторными силами [Ландау и Лифшиц, 1982; Guglielmi and Pokhotelov, 1996]. Как следует из работы [Вайнштейн и др., 1980] в магнитогидродинамическом приближении пондеромоторные силы  $F$ , действующие на границу, определяются простым выражением:  $F = \nabla \langle B^2 \rangle / 8\pi$ , где  $B$  – напряженность ММП. Еще одним немаловажным фактором существования неустойчивости Майлса–Филлипса является связь магнитного давления плазмы солнечного ветра со спектральными характеристиками генерируемых пульсаций. Согласно механизму Майлса образование поверхностных волн определяется линейной связью между волнами и средним течением пограничного слоя (слой совпадения). Следовательно, спектральные компоненты турбулентных пульсаций солнечного ветра вызывают возмущение среднего

течения. Обратная связь возмущений в слое совпадения приводит к росту уровня турбулентных пульсаций. Таким образом, скорость роста спектральной плотности  $S(k)$  пропорциональна  $S(k)$ , т.е.  $\partial S(k)/\partial t = \gamma S(k)$ , где  $\gamma$  зависит от среднего профиля пограничного слоя. Другими словами, наличие турбулентных пульсаций в ветре (не связанных с поверхностными волнами) учитывается лишь при выборе профиля скорости сдвигового потока и игнорируется при исследовании малых колебаний этого потока. Как следует из рис. 3, наблюдается высокая корреляция между фрактальной размерностью (отражающей наклон огибающей спектральной плотности) серий всплесков пульсаций *ipcl* и магнитным давлением, что подтверждает вышеописанный механизма Майлса. Таким образом, флуктуации параметров солнечного ветра при обтекании магнитосферы, по-видимому, оказывают существенное влияние на формирование спектра поверхностных волн.

Совокупность следующих экспериментальных фактов, полученных в данной работе и ранее проведенных исследованиях, таких как: 1) появление серий всплесков *ipcl* определяется пороговыми значениями скорости и динамического давления солнечного ветра, в доминирующем числе случаев всплески возбуждаются при  $V < 500$  км/с при достижении определенного порогового значения  $V \sim 320$  км/с и  $P \sim 1$  нПа (рис. 1); 2) динамика интенсивности всплесков тесно связана с вариацией скорости солнечного ветра (рис. 2); 3) всплески *ipcl* обладают закономерностями перемежающихся процессов и, следовательно, генерируются в турбулизованной среде, что подтверждается степенным распределением амплитуд всплесков и экспоненциальным распределением межпиковых интервалов [Куражковская и Клайн, 2009]; 4) параметры наиболее интенсивных всплесков *ipcl* из каждой серии удовлетворяют количественному соотношению между амплитудой, продолжительностью и частотой заполнения волновых пакетов, характерному для солитонов альвеновского типа [Клайн и Куражковская, 2000]; 5) всплески *ipcl* – нелинейные структуры, фрактальная размерность которых зависит от модуля напряженности ММП [Клайн и Куражковская, 1998] и магнитного давления плазмы солнечного ветра (рис. 3); 6) серии всплесков пульсаций *ipcl* наблюдаются при  $\beta > 1$  (табл. 3), что является характерным признаком высокотемпературной плазмы, в которой происходит генерация альвеновских волн; 7) частота появления всплесковых режимов связана с корональными дырами, продуцирующими высокотемпературные потоки (рис. 4), свидетельствует о том, что наиболее вероятным механизмом генерации всплесковых режимов *ipcl* может быть именно неустойчивость Майлса–Филлипса на передней границе магнитосферы.

В заключение следует отметить, что исследуемые нами всплесковые режимы иррегулярных длиннопериодных пульсаций – сложное многогранное явление. Множество закономерностей, которые присущи этому типу пульсаций, трудно объяснить в рамках какого-либо одного механизма генерации. Очевидно, что классические механизмы генерации длиннопериодных пульсаций, такие как импульсное пересоединение, нестабильность Кельвина–Гельмгольца, флуктуации ионосферных токов могут быть исключены из потенциальных механизмов возбуждения серий всплесков пульсаций *ipcl*.

Полученные нами экспериментальные результаты показывают, что серии всплесков пульсаций *ipcl* обладают многими свойствами, характерными для развития ветровой неустойчивости. Существенную роль при генерации серий всплесков *ipcl* играют флуктуации некоторых параметров солнечного ветра и ММП, с которыми тесно связаны характеристики пульсаций. По-видимому, можно провести аналогию между образованием ветровых волн на морской поверхности и возникновением поверхностных волн (всплесковых режимов *ipcl*) на магнитопаузе. Последовательность всплесков пульсаций *ipcl*, возникая вследствие нарастания неустойчивости Майлса–Филлипса, в виде альвеновских солитонов распространяются из подсолнечной области магнитосферы в полярные каспы.

## 5. ВЫВОДЫ

Проведенное статистическое исследование связи длиннопериодных иррегулярных пульсаций в диапазоне частот 2.0–6.0 мГц (серии всплесков пульсаций *ipcl*) с геомагнитной активностью, параметрами солнечного ветра и ММП показало, что генерация всплесковых режимов не связана ни с высокой планетарной активностью, ни с развитием сильных магнитных возмущений как на передней границе, так и в хвосте магнитосферы. Обнаружены пороговые значения скорости  $V \sim 320$  км/с и динамического давления солнечного ветра  $P \sim 1$  нПа, при которых начинается возбуждение всплесковых режимов. Из всех факторов межпланетной среды вариацией амплитуды всплесков *ipcl* управляет скорость солнечного ветра, а динамикой фрактальной размерности серий всплесков *ipcl* магнитное давление плазмы солнечного ветра.

Выявлена связь между частотой появления всплесков *ipcl* и числом полярных корональных дыр на Солнце, что позволило отождествить геоэффективные области на Солнце, которые могут быть источником потоков солнечного ветра и альвеновских волн, способствующих генерации всплесковых режимов.

На основе анализа условий межпланетной среды, благоприятных для возбуждения серий всплесков пульсаций *ipcl*, и обобщения морфологических закономерностей проанализированы потенциальные механизмы их генерации. Вся совокупность полученных экспериментальных фактов свидетельствует о том, что пульсации *ipcl* возбуждаются на передней границе магнитосферы.

Выдвинуто предположение, что наиболее вероятным механизмом генерации всплесковых режимов *ipcl* является механизм, аналогичный ветровой неустойчивости в гидродинамике (механизм Майлса—Филлипса). Для развития неустойчивости Майлса—Филлипса на магнитопаузе характерны те же закономерности, что и для условий генерации всплесковых режимов *ipcl*, а именно турбулентность, пороговое значение скорости, флуктуации магнитного давления и другие.

Авторы признательны А.В. Гульельми за полезные дискуссии.

Работа частично поддержана Программой Президиума РАН № 4.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андронов А.А., Фабрикант А.Л. Затухание Ландау, ветровые волны и свисток // Нелинейные волны. Под ред. Гапонова-Грехова А.В. М.: Наука, С. 68–104. 1979.
- Большакова О.В., Троицкая В.А., Хесслер В.П. Диагностика положения приполюсной границы дневного каспа по интенсивности высокоширотных пульсаций // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 15. № 4. С. 755–757. 1975.
- Вайнштейн С.И., Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А. Турбулентное динамо в астрофизике. М.: Наука, 1980.
- Вробель А.О., Конторович В.М. Ветровая неустойчивость облаков радиогалактик // Письма в Астроном. журн. Т. 8. № 6. С. 330–333. 1982.
- Гульельми А.В., Потапов А.С., Клайн Б.И. Комбинированная неустойчивость Рэлея—Тейлора—Кельвина—Гельмгольца на магнитопаузе // Солнечно-земная физика. Вып. 15. С. 24–27. 2010.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.
- Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Фрактальные свойства серий всплесков высокоширотных длиннопериодных иррегулярных пульсаций типа *ipcl* // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 38. № 3. С. 163–168. 1998.
- Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Солитоноподобные структуры в длиннопериодных геомагнитных пульсациях *ipcl* // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 40. № 2. С. 17–22. 2000.
- Клайн Б.И., Куражковская Н.А., Куражковский А.Ю. Переменяемость в волновых процессах // Физика Земли. № 10. С. 25–34. 2008.
- Клейменова Н.Г., Большакова О.В., Куражковская Н.А., Фриис-Кристенсен Е. Очень длиннопериодные пульсации геомагнитного поля в полярных шапках и их связь с ионосферным *DPY*-током // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 26. № 6. С. 985–989. 1986.
- Клейменова Н.Г., Большакова О.В., Троицкая В.А., Фриис-Кристенсен Е. Два вида длиннопериодных геомагнитных пульсаций вблизи экваториальной границы дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 25. № 1. С. 163–164. 1985.
- Коваленко В.А. Солнечный ветер. М.: Наука, 1983.
- Куражковская Н.А. О возможных источниках высокоширотных пульсаций *vlp* // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 30. № 2. С. 343–345. 1990.
- Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Особенности всплесков длиннопериодных иррегулярных геомагнитных пульсаций типа *ipcl* в области дневного каспа // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 37. № 5. С. 184–190. 1997.
- Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Спектральные и поляризационные особенности серий всплесков пульсаций *ipcl* // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 43. № 3. С. 351–360. 2003.
- Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Всплесковые режимы длиннопериодных иррегулярных пульсаций в диапазоне частот 2.0–6.0 МГц и суббуравая активность на ночной стороне магнитосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 4. С. 483–493. 2009.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
- Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980.
- Прист Э.Р. Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир, 1985.
- Птицына Н.Г., Гудков М.Д. Ветровая неустойчивость как возможный источник длиннопериодных геомагнитных пульсаций // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 31. № 3. С. 414–419. 1991.
- Филлипов Б.П. Эруптивные процессы на Солнце. М.: Физматлит, 2007.
- Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана. М.: Мир, 1969.
- Dunlop I.S., Menk F.N., Hansen H.J., Fraser B.J., Morris R.J. A multistation study of long period geomagnetic pulsations in the polar cleft and cusp. In: Burns G.B. and Duldig M.L. (Eds). *Anare Research Notes Number 88*. P. 29–41. 1992.
- Farrugia C.J., Gratton F.T., Bender L., Biernat H.K., Erkaev N.V., Quinn J.M., Torbert R.B., Dennisenko V. Charts of joint Kelvin–Helmholtz and Rayleigh–Taylor instabilities at the dayside magnetopause for strongly northward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 103. № A4. P. 6703–6727. 1998.
- Farrugia C.J., Gratton F.T., Torbert R.B., Bender L., Gnavi G., Ogilvie K.W., Stauning P. On the dependence of dayside Kelvin–Helmholtz activity on IMF orientation // *Adv. Space Res.* V. 31. № 4. P. 1105–1110. 2003.

- Friis-Christensen E., Vennerstrom S., Clauer C.R., McHenry M.A. Irregular magnetic pulsations in the polar cleft caused by traveling ionospheric convection vortices // *Adv. Space Res.* V. 8. № 9–10. P. 311–314. 1988.
- Guglielmi A.V., Pokhotelov O.A. Geoelectromagnetic waves. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, Techno House, 1996.
- Iijima T., Fujii R., Potemra T.A., Saflekos N.A. Field-aligned currents in the south cusp and their relationship to the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 83. № 12. P. 5595–5603. 1978.
- Kawano H., Russell C.T. Survey of flux transfer events observed with the ISEE 1 spacecraft: rotational polarity and the source region // *J. Geophys. Res.* V. 101. № A12. P. 27,2999–27,308. 1996.
- Korotova G.I., Sibeck D.G., Rosenberg T. Seasonal dependence of Interball flux transfer events // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. № 5. L05106. 4 PP. doi:10.1029/2008GL033254. 2008.
- Lanzerotti L.J., Lee L.C., MacLennan C.G., Wolfe A., Medford L.V. Possible evidence of flux transfer events in the polar ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* V. 13. № 11. P. 1089–1092. 1986.
- Lanzerotti L.J., MacLennan C.G. Hydromagnetic waves associated with possible flux transfer events // *Astrophysics and Space Science.* V. 144. P. 279–290. 1988.
- Mishin V.V. Accelerated motions of the magnetopause as a trigger of the Kelvin–Helmholtz instability // *J. Geophys. Res.* V. 98. № A11. P. 21,365–21,371. 1993.
- Nakagawa M. A critical exponent method to evaluate fractal dimensions of self-affine data // *J. Phys. Soc. Jpn.* V. 62. № 12. P. 4233–4239. 1993.
- Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Engebretson M.J., Papitashvili V.O., Watermann J.F. Poleward progressing quasi-periodic disturbances at cusp latitudes: The role of wave processes // *J. Geophys. Res.* V. 105. № A12. P. 27,569–27,587. 2000.
- Russel C.T., Elphic R.C. ISEE observations of flux transfer events at the dayside magnetopause // *Geophys. Res. Lett.* V. 6. P. 33–36. 1979.
- Troitskaya V.A., Bolshakova O.V., Hessler V.B. Irregular geomagnetic pulsations in the polar cap. Rep. Assem. IAGA. Int. Assoc. Geom. and Aeron. Rockville, Md. 1973.