

УДК 538.745

## СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

© 2013 г. В. Н. Обридко, Х. Д. Канониди, Т. А. Митрофанова, Б. Д. Шельтинг

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, (ИЗМИРАН) г. Троицк (Московская обл.)*

*e-mails: obridko@izmiran.ru; kanonidi@izmiran.ru; tamara\_m@bk.ru; shelting@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 23.08.2011 г.

После доработки 14.12.2011 г.

Анализ данных магнитной обсерватории ИЗМИРАН показал, что геомагнитные бури с внезапным и постепенным началом образуют две независимые популяции, не связанные ни временем появления, ни характером самого возмущения. Это различие определяется тем, что источники на Солнце, вызывающие эти возмущения, различны: бури с внезапным началом вызываются корональными выбросами масс, бури с постепенным началом вызываются высокоскоростными потоками солнечного ветра, истекающими из корональных дыр.

DOI: 10.7868/S0016794013010148

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Целью данного исследования является изучение распределения магнитных бурь с постепенным началом и внезапным началом (1950–2010 гг.) за пять циклов солнечной активности. Кроме этого представляет определенный интерес годичный ход (распределение по месяцам) магнитных бурь различного происхождения.

В работе была поставлена задача конкретизировать особенности различных магнитных возмущений с целью определения взаимосвязи с циклами солнечной активности. Также следовало выяснить сезонные вариации магнитных бурь и их особенности.

Известно, что существуют два источника геомагнитной активности [Legrand and Simon, 1981, 1989; Venkatesan et al., 1982, 1991; Feynman, 1982; Simon and Legrand, 1989; Gonzalez et al., 1990; Echer et al., 2004]. Один из источников (Корональные Выбросы Массы, или КВМ) более или менее согласуется с ходом солнечного цикла, поскольку связан с сильными замкнутыми локальными полями, наиболее известным индексом которых являются числа солнечных пятен. Второй источник — это высокоскоростные потоки солнечного ветра. Они связаны с корональными дырами, которые в значительной мере определяются крупномасштабными и глобальными магнитными полями. Крупномасштабные поля также подчиняются 11-летней цикличности, однако их максимум смещен относительно максимума цикла пятен [Obriadko and Shelting, 1992, 1999; Platov and Makarov, 2005; Наговицын, 2006; Обридко и др., 2009, 2011]. Геомагнитные возмущения во многих циклах достигают максимальной частоты появления не в максимуме чисел солнечных пятен, а на несколь-

ко лет позднее [Svalgaard, 1977; Legrand and Simon, 1981, 1985; Sargent, 1985; Simon and Legrand, 1989; Tsurutani et al., 1995, 2006; Wang et al., 2000; Richardson et al., 2002; Schwenn, 2006].

Геомагнитные возмущения также делятся на два типа: бури с постепенным и внезапным началом. В настоящей работе мы покажем, что их отличие состоит именно в том, что они связаны с разными агентами на Солнце и поэтому образуют не зависимые друг от друга и некоррелированные популяции.

### 2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Для статистического анализа в нашем распоряжении находился материал геомагнитной обсерватории за период времени с 1950 г. по 2010 г.

Все данные о состоянии магнитного поля Земли получены в ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова г. Троицк (Московская обл.). Сведения о солнечной активности получены из специальной литературы и Интернет. Данные о корональных выбросах массы взяты из каталога [Gopalswamy et al., 2010], информация о корональных дырах — с сайта Яаан Алвестад Coronal hole history (since late October 2002) [2002] с октября 2002 г., а за более ранний период — непосредственно по наблюдениям в EUV диапазоне на космической станции SOHO [Обридко и др., 2011].

### 3. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ПОЯВЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ С ЧИСЛОМ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Все исходные данные представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Магнитные бури различного типа (1950–2010 гг.)

Год	Количество бурь			Числа солнечных пятен	Год	Количество бурь			Числа солнечных пятен
	Всего	Бури с постепенным началом	Бури с внезапным началом			Всего	Бури с постепенным началом	Бури с внезапным началом	
1950	32	19	13	83.9	1981	46	26	20	140.5
1951	59	52	7	69.4	1982	73	59	14	115.9
1952	51	46	5	31.5	1983	64	50	14	66.6
1953	29	29	0	13.9	1984	56	51	5	45.9
1954	23	22	1	4.4	1985	37	33	4	17.9
1955	27	23	4	38.0	1986	35	31	4	13.4
1956	50	32	18	141.7	1987	35	32	3	29.2
1957	53	29	24	190.2	1988	46	38	8	100.2
1958	47	31	16	184.8	1989	67	37	30	157.6
1959	43	25	18	159.0	1990	41	25	16	142.6
1960	58	42	16	112.3	1991	53	38	15	145.7
1961	47	36	11	53.9	1992	43	33	10	94.3
1962	41	36	5	37.6	1993	47	39	8	54.6
1963	21	18	3	27.9	1994	54	50	4	29.9
1964	27	23	4	10.2	1995	53	49	4	17.5
1965	20	13	7	15.1	1996	26	26	0	8.6
1966	30	19	11	47.0	1997	30	21	9	21.5
1967	38	25	13	93.7	1998	43	38	5	64.3
1968	40	30	10	105.9	1999	59	43	16	93.3
1969	31	17	14	105.5	2000	72	47	25	119.6
1970	28	11	17	104.5	2001	58	37	21	111.0
1971	28	17	11	66.6	2002	63	45	18	104.0
1972	33	23	10	68.9	2003	109	93	16	63.7
1973	44	42	2	38.0	2004	55	42	13	40.4
1974	37	32	5	34.5	2005	63	53	10	29.8
1975	34	31	3	15.5	2006	40	37	3	15.2
1976	30	28	2	12.6	2007	33	30	3	8.0
1977	31	26	5	27.5	2008	27	25	2	3.0
1978	45	27	18	92.5	2009	7	7	0	3.1
1979	35	12	23	155.4	2010	25	22	3	16.5
1980	35	20	15	154.6	Сумма	2607	1993	614	

Визуальные расчеты выявили, что за этот период времени произошло 2607 геомагнитных возмущений разной интенсивности и различного характера. Выяснилось, что 614 бурь, т.е. 24%, были бурями с внезапным началом. Остальные 1993 бури (76%) — это бури с постепенным началом. Итак, бурь с внезапным началом оказалось в три раза меньше, чем бурь с постепенным началом. При этом количество больших и очень больших

бурь в первой и второй категории, которые мы рассматривали, практически одинаково.

Анализ показал, что с усилением солнечной активности пропорционально увеличивается количество магнитных бурь с внезапным началом, и их максимумы полностью совпадают. Это наглядно показано на рис. 1а.

Здесь изображены несколько циклов солнечной активности за период с 1950–2010 гг. и гра-

**Таблица 2.** Распределение количества магнитных бурь по месяцам (1950–2010 гг.)

Месяц	Бури с постепенным началом	Бури с внезапным началом	Все бури
I	180	34	214
II	163	54	217
III	179	59	238
IV	164	62	226
V	160	56	216
VI	148	53	201
VII	150	54	204
VIII	145	60	205
IX	184	52	236
X	198	56	254
XI	171	43	214
XII	151	31	182
Сумма	1993	614	2607
Среднемесечное значение	217.25	51.17	166.08
Среднеквадратичное отклонение от среднего	19.22	9.96	16.60

фик магнитных бурь с внезапным началом за то же время.

Поведение бурь с постепенным началом иное. Их максимум наступает через 2–3 года после максимума солнечной активности (рис. 1б).

Можно рассчитать корреляцию появления бурь этих двух типов с числом солнечных пятен. Коэффициент корреляции бурь с внезапным началом и числом солнечных пятен довольно велик и составляет  $0.872 \pm 0.06$ . Коэффициент корреляции бурь с постепенным началом и числа солнечных пятен, наоборот, очень мал и фактически равен нулю,  $0.014 \pm 0.13$ . Однако, если построить кросскорреляционную функцию, сдвигая график чисел солнечных пятен вперед, то коэффициент корреляции начинает расти (см. рис. 2).

При сдвиге на 3 года коэффициент корреляции достигает максимума и составляет  $0.41 \pm 0.12$ .

На рисунке 3 показаны графики регрессии бурь с внезапным началом (открытые кружки) без сдвига и бурь с постепенным началом (заполненные кружки) при сдвиге 3 года. По оси абсцисс указаны числа солнечных пятен.

Следует обратить внимание на то, что угловые коэффициенты связи на диаграммах практически совпадают. Они составляют 0.115 для бурь с постепенным началом, и 0.119 – для бурь с внезапным началом. Это различие статистически несущественно и означает, что механизмы взаимодействия набегающего потока солнечного ветра в обоих случаях одинаковы. Различия между этими двумя типами бурь, а именно: частота возникновения, сдвиг по времени и профиль возмущения,

определяются свойствами ответственных за их возникновение солнечных агентов.

#### 4. ДВА ТИПА БУРЬ – РАЗНЫЕ ПОПУЛЯЦИИ

В этом разделе мы сопоставим частоту появления бурь разной мощности с числом солнечных пятен. Величина магнитных бурь определялась в нТл ( $10^{-5}$  эрстед) по правилам Международного комитета по следующим параметрам (см. табл. 3):

На рисунках 4 и 5 показано сопоставление всех – сильных, средних и слабых – бурь с внезапным (сплошные кривые, рис. 4) и постепенным (сплошные кривые, рис. 5) началом с числом солнечных пятен (штриховая линия). Для упрощения рассмотрения и увеличения статистики мы объединили сильные и очень сильные бури в один класс. Из сравнения этих рисунков видно, что бури всех интенсивностей подчиняются правилу, сформулированному нами выше, а именно: бури с внезапным началом хорошо согласуются с кривой чисел солнечных пятен, а бури с постепенным началом смещены на 1–3 года. При этом сильных бурь обоих типов приблизительно одинаковое число, но средних и слабых бурь с постепенным началом значительно больше, чем бурь той же мощности с внезапным началом.

Интересно, что из графиков виден плавный рост геомагнитной активности с постепенным началом со временем, отмеченный ранее в статье [Kishcha et al., 1999]. При этом этот рост полностью определяется ростом числа бурь с постепенным началом средней и слабой интенсивности и вообще отсутствует в бурях с внезапным началом.

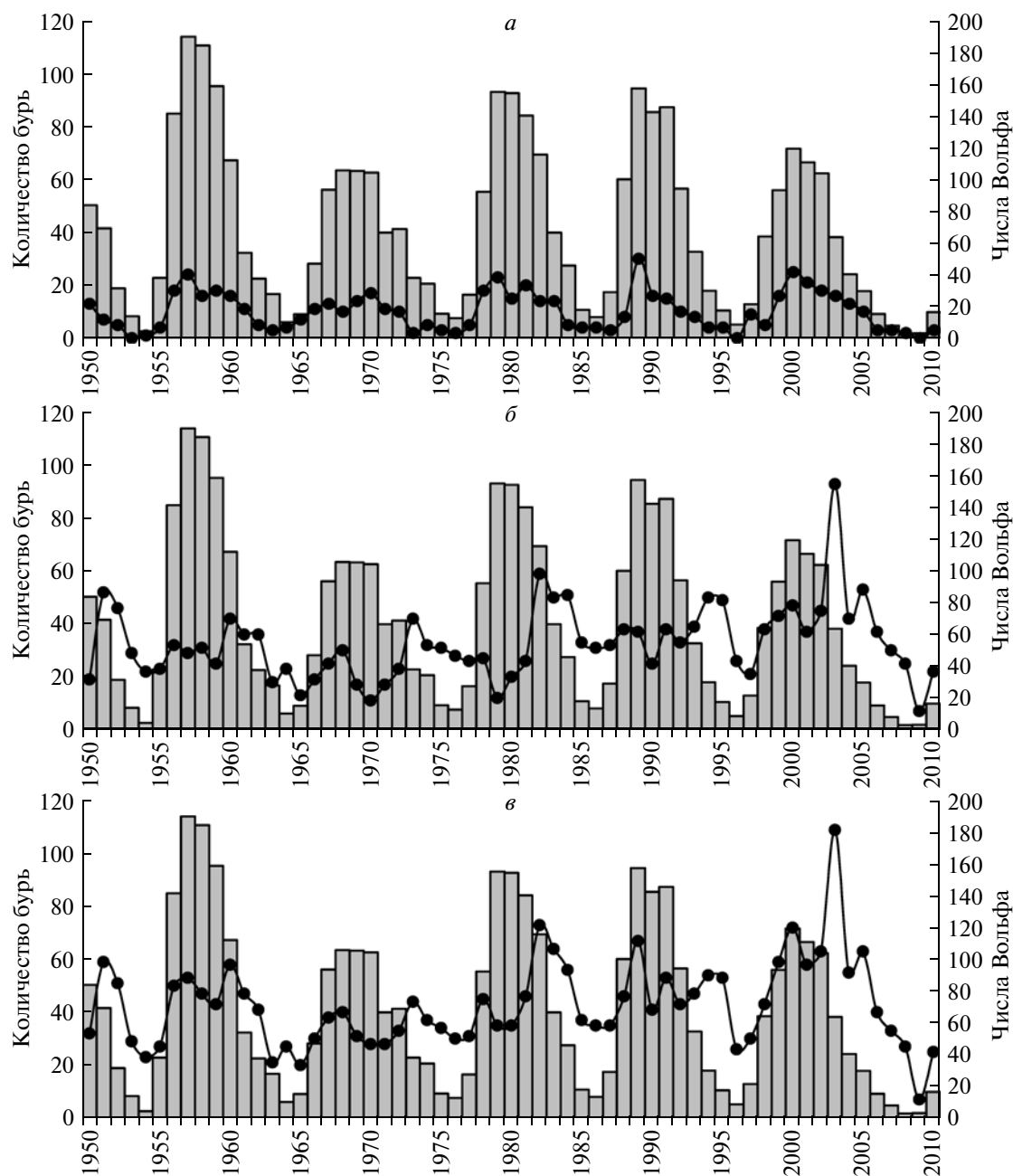


Рис. 1. Распределение магнитных бурь по годам (1950–2010 гг.). *а* – бури с внезапным началом, *б* – бури с постепенным началом; *в* – все бури.

Для исследования связи частотной встречаемости бурь различных типов и величин были выполнены расчеты их взаимной корреляции. Оказалось, что внутри каждого типа бурь корреляция очень высокая. Для бурь с постепенным началом корреляция полного списка всех бурь с бурями разной величины составляет 0.84, 0.78 и 0.62 для бурь слабых, средних и сильных соответственно. Для бурь с внезапным началом корреляция полного списка с бурями разной величины составляет 0.78, 0.88 и 0.82 для бурь слабых, средних и сильных

соответственно. Правда, внутренняя корреляция встречаемости самых слабых и сильных бурь несколько падает. Она составляет 0.24 и 0.37 для бурь с постепенным и внезапным началом соответственно.

Очень важным для понимания природы бурь разных типов является полное отсутствие корреляции между ними. Коэффициент корреляции не превышает 0.10 с ошибкой 0.15. Таким образом, бури этих типов образуют две независимые попу-

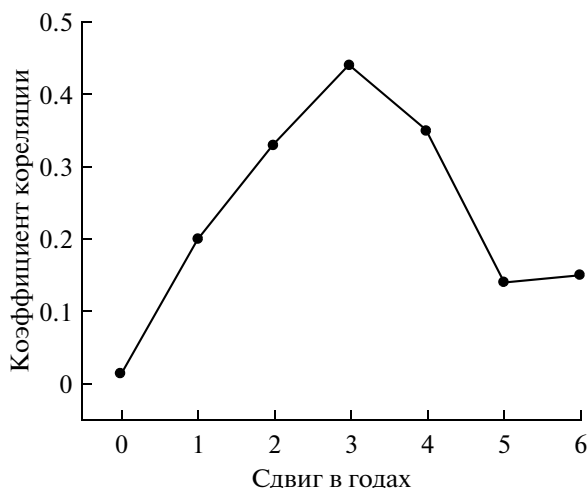


Рис. 2. Кросскорреляционная функция среднегодовых значений чисел солнечных пятен и числа бурь с постепенным началом. По оси абсцисс указан сдвиг в годах.

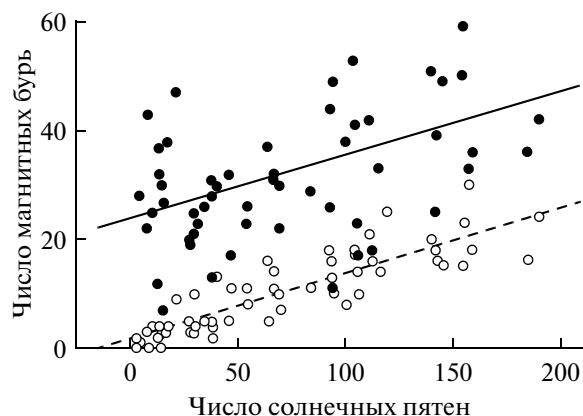


Рис. 3. Регрессии бурь с внезапным началом (открытые кружки) без сдвига и бурь с постепенным началом (заполненные кружки) при сдвиге 3 года. По оси абсцисс указаны числа солнечных пятен.

ляции, что несомненно связано с разной природой возбуждающих их солнечных агентов.

### 5. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СЕЗОНА

Следующим этапом анализа было распределение по месяцам года числа исследуемых бурь. Построены соответственно графики (см. табл. 3 и рис. 6а, б, в). Известно, что взаимное расположение оси земного магнитного диполя и среднего направления межпланетного магнитного поля систематически изменяется в течение года, и в связи с этим меняется геоэффективность возмущений солнечного ветра. Поэтому в геомагнитной активности наблюдается полугодовая волна с максимумами вблизи дней весеннего и осеннего равноденствия и минимумами в июне и декабре около дней летнего и зимнего солнцестояния.

На рисунке 6 показано распределение магнитных бурь по месяцам (1950–2010 гг.) в долях средних за весь период значений для каждого месяца. Заштрихована область, в которой наблюдаемые значения встречаемости отличаются от среднего равномерного значения меньше, чем на одно среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ . Видно, что

эффект повышения количества магнитных бурь в месяцы осеннего равноденствия действительно наблюдается, однако он выражен довольно слабо, на грани достоверности. Только бури с постепенным началом (и, как следствие, все бури) в октябре имеют максимум,  $\sim 2\sigma$ . Для бурь с внезапным началом очень слабо выражен максимум в апреле и сильно выражен минимум в декабре–январе. Ранее Legrand и Simon [1985] эффект подтвердили на основе анализа особо сильных бурь за 1868–1980 гг. Однако и в их работе отклонение  $\sim 2\sigma$  от среднего в положительную сторону достигается только в марте, и существенно меньшее отклонение ( $1.5\sigma$ ) в отрицательную сторону – в июне и декабре.

Причина малости сезонного эффекта неясна. Возможно, его значение в литературе вообще преувеличено. Однако не исключено, что этот эффект зависит от полярности общего магнитного поля Солнца [Obridko et al., 2002; Обридко и др., 2004]. В таком случае сезонный эффект вообще нельзя рассматривать, усредняя данные сразу по нескольким циклам. Необходимо учитывать переполюсовку общего магнитного поля и объединять вместе те го-

Таблица 3. Характеристика магнитных бурь

Характеристика бури	$D$	$H$	$Z$
Малая	100–139	80–125	40–90
Умеренная	140–200	126–200	91–140
Большая	201–290	201–270	141–250
Очень большая	$\geq 291$	$\geq 271$	$\geq 251$

Примечание: Здесь  $D$ ,  $H$  и  $Z$  – магнитное склонение, горизонтальная и вертикальная составляющие геомагнитного поля соответственно.

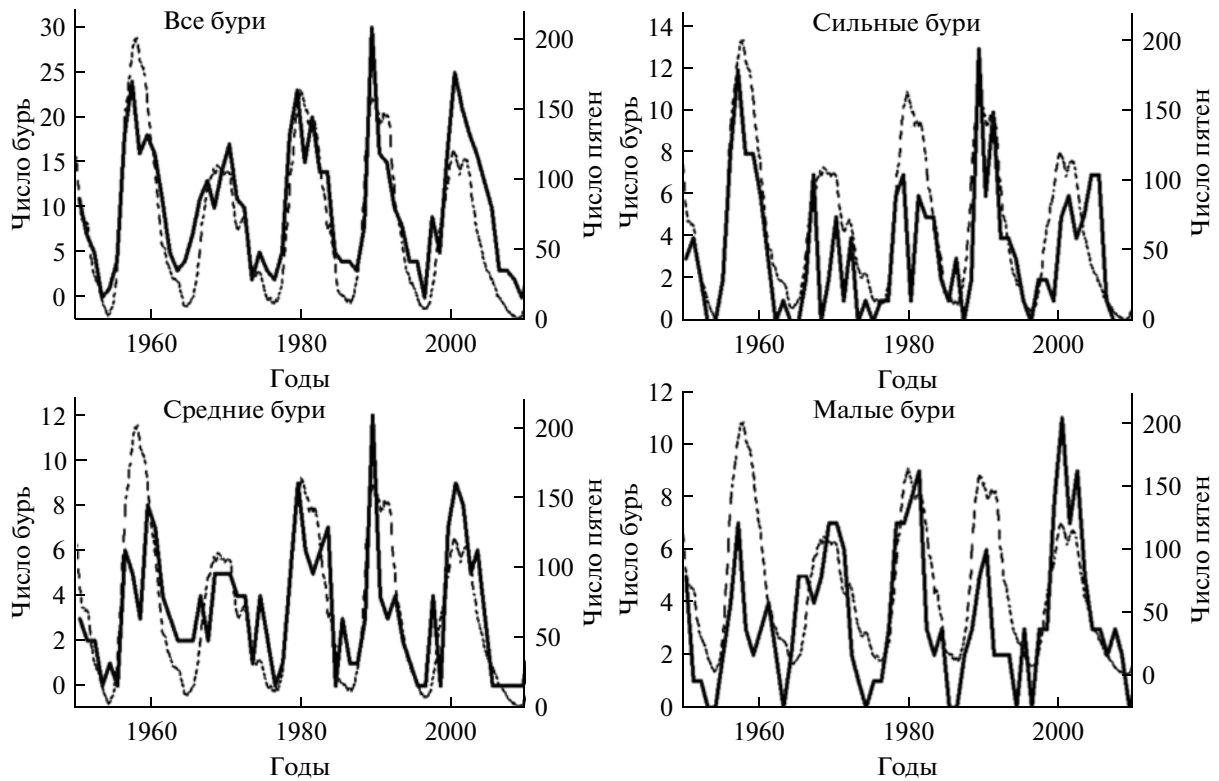


Рис. 4. Сопоставление годового числа всех, сильных, средних и слабых бурь с внезапным началом (сплошные кривые) с числом солнечных пятен (штриховая линия).

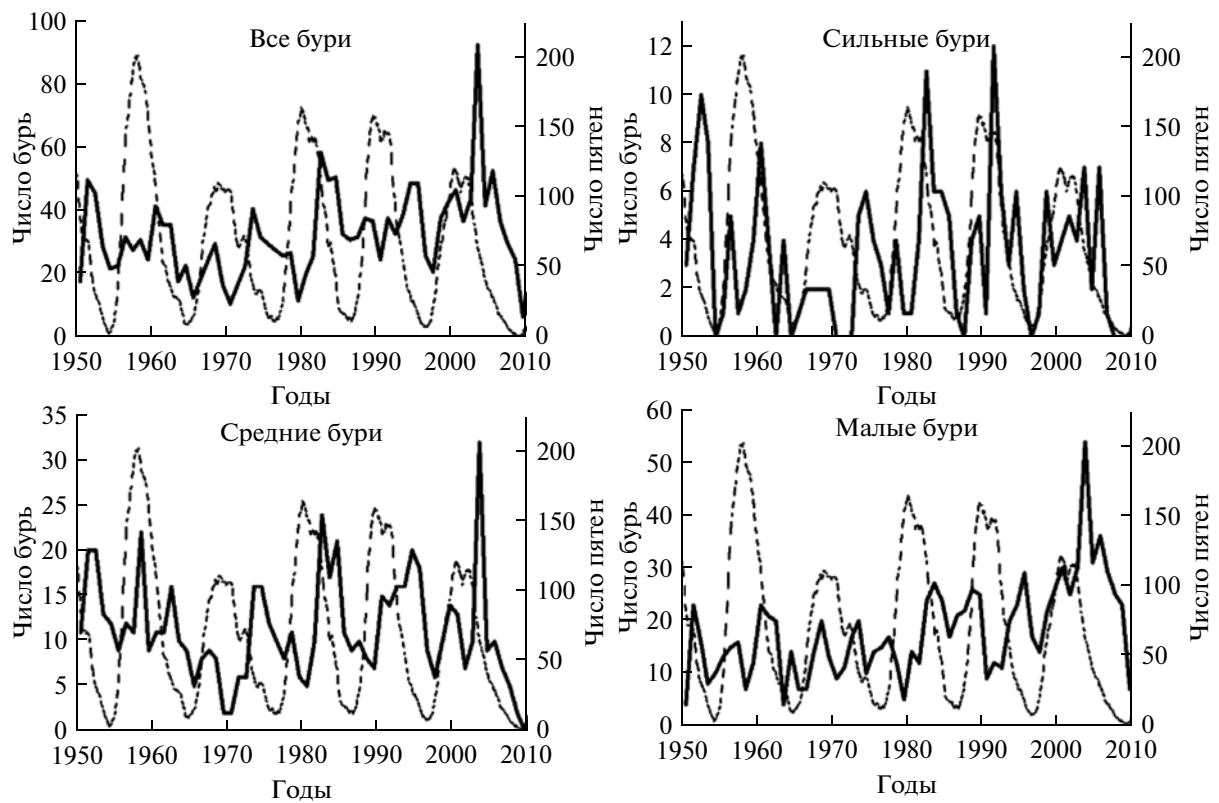


Рис. 5. Сопоставление числа всех, сильных, средних и слабых бурь с постепенным началом (сплошные кривые) с числом солнечных пятен (штриховая линия).

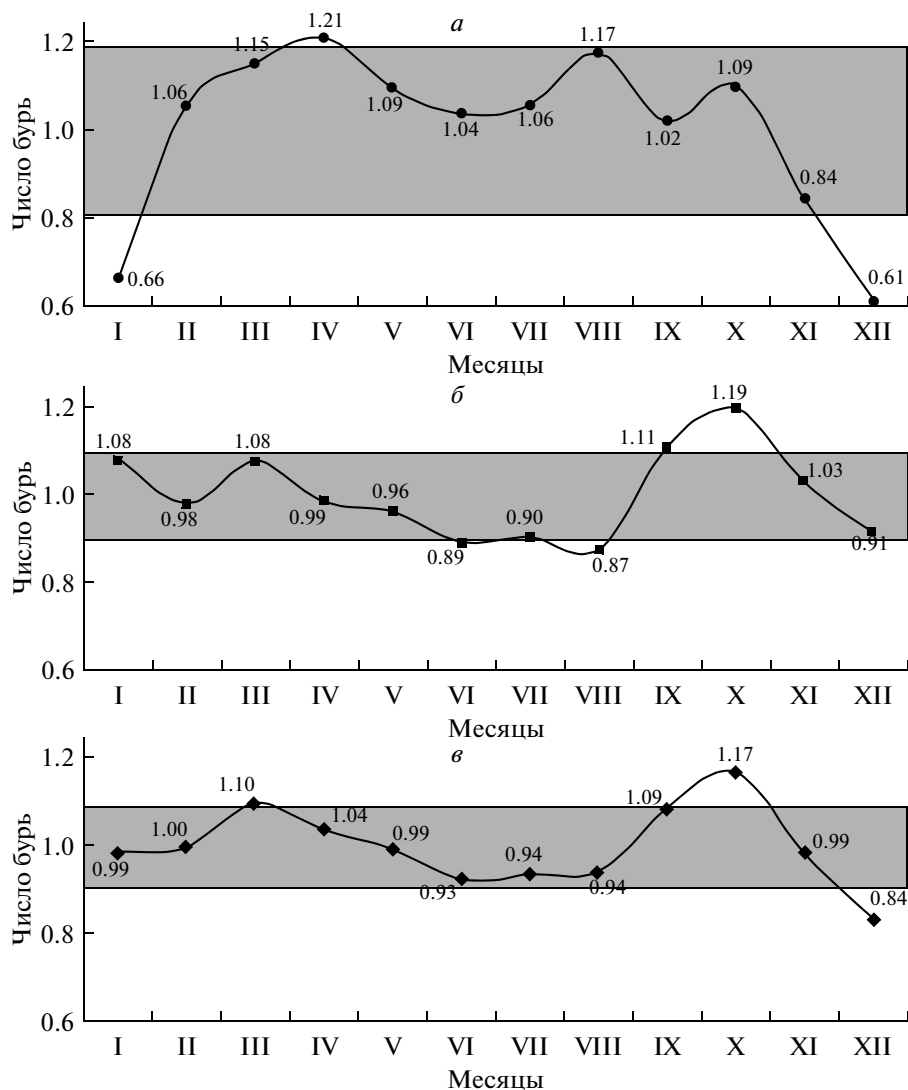


Рис. 6. Распределение магнитных бурь по месяцам (1950–2010 гг.) в долях средних за весь период значений для каждого месяца. *a* – бури с внезапным началом; *б* – бури с постепенным началом; *в* – все бури.

ды, когда общее магнитное поле на Солнце имело один и тот же знак.

С другой стороны, нельзя не отметить резкое различие сезонных кривых встречаемости для бурь с постепенным и внезапным началом. Коэффициент корреляции между этими кривыми равен  $0.016 \pm 0.29$ , т.е. строго равен нулю. Это еще раз подчеркивает различие между этими двумя типами бурь и прямо указывает на различие солнечных агентов, ответственных за их появление.

## 6. СОЛНЕЧНЫЕ АГЕНТЫ – КОРОНАЛЬНЫЕ ДЫРЫ И КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ

Солнечные геоэффективные агенты многообразны, но условно их можно подразделить на две

группы. Корональные выбросы массы, часто связанные со вспышками, представляют собой магнитное облако, приходящее к Земле с относительно высокой скоростью 600–1000 км/с. Обычно они имеют резкий передний фронт и приводят к возникновению магнитных бурь с внезапным началом (ВН). Поскольку на Солнце эти агенты чаще связаны с активными областями (т.е. тем, что принято называть локальными магнитными полями), можно ожидать (и это подтверждено статистикой) высокой корреляции бурь с внезапным началом и чисел солнечных пятен. Высокоскоростные потоки солнечного ветра распространяются со скоростью 450–700 км/с и приводят к возникновению бурь с постепенным началом. Они связаны с корональными дырами на Солнце, которые достигают наибольшего развития через

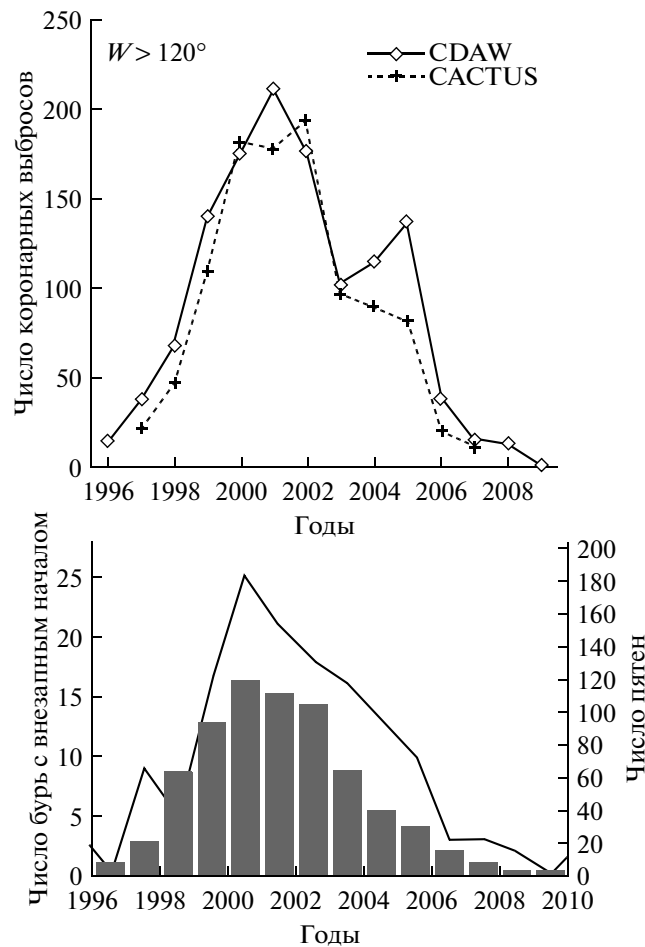


Рис. 7. Распределение по годам коронарных выбросов массы, числа солнечных пятен и бурь с внезапным началом в 23-ем цикле солнечной активности.

5–6 лет после максимума чисел солнечных пятен. Поэтому можно ожидать (и это подтверждено статистикой) сдвиг на полцикла между числом бурь с постепенным началом (ПН) и числами солнечных пятен.

На рисунке 7 показано распределение по годам коронарных выбросов массы, числа солнечных пятен и бурь с внезапным началом в 23-ем цикле солнечной активности. Основой для рисунка послужили данные из работы [Gopalswamy et al., 2010], но использованы данные только двух каталогов, которые авторы считают наиболее достоверными: каталог, подготовленный Coordinated Data Analysis Workshop (CDAW), и Computer Aided CME Tracking (CACTus) каталог [Robbrecht and Berghmans, 2004]. На нижней панели сплошной линией показано распределение по годам появления бурь с внезапным началом, и в виде гистограммы – распределение чисел солнечных пятен. Совпадение всех трех кривых очевидно.

На рисунке 8 показано аналогичное сравнение распределений коронарных дыр, чисел солнечных пятен и бурь с постепенным началом. Сходство этих кривых несомненно, коэффициент корреляции составляет  $0.6 \pm 0.17$ , хотя количество магнитных бурь падает с приближением к минимуму быстрее, чем число коронарных дыр. Возможно, это специфика 23-го цикла, в котором на фазе спада было необычно большое число экваториальных коронарных дыр [Обридко и Шельтинг, 2009].

Вторичный максимум встречаемости сильных бурь через 3 года после максимума чисел солнечных пятен отметили ранее Legrand and Simon [1985], однако не связали его непосредственно с коронарными дырами, о которых тогда было мало что известно. Позднее Tsurutani et al. [1995] высказали предположение, что этот сдвиг связан с циклической вариацией открытых магнитных полей на Солнце, а в дальнейшем [Tsurutani et al., 2006] прямо указали на связь коротирующих потоков с коронарными дырами.



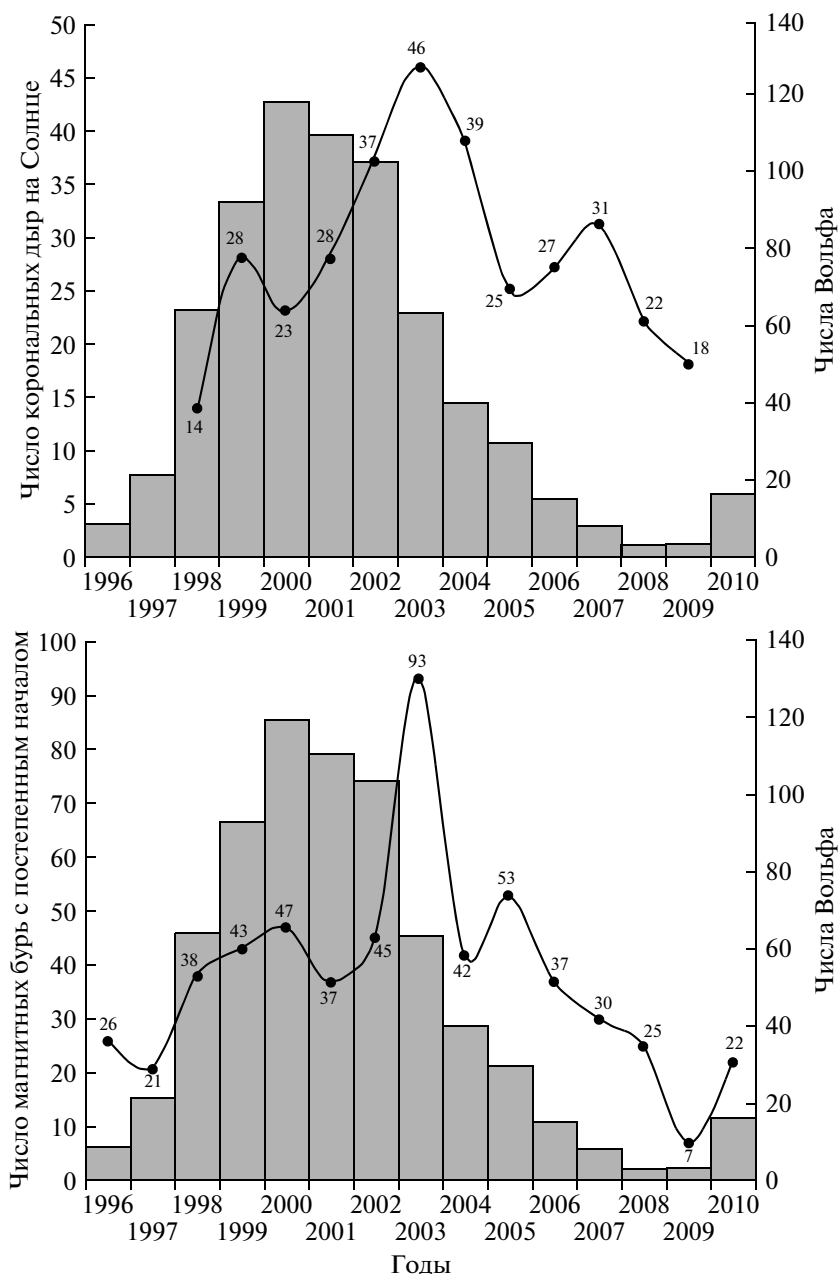


Рис. 8. Распределение по годам корональных дыр, числа солнечных пятен и бурь с постепенным началом в 23-ем цикле солнечной активности.

## 7. ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ, проведенный на основе длительных однородных данных, показал значительные различия в проявлениях геомагнитных возмущений с внезапным и постепенным началом. Оба эти типа возмущений образуют две независимые популяции, не связанные ни временем появления, ни характером самого возмущения. Частота появления этих двух типов возмущения по-разному зависит от сезона года. Различие опре-

деляется тем, что источники на Солнце, вызывающие эти возмущения, различны, по-разному локализованы на диске Солнца и имеют разную циклическую зависимость. Бури с внезапным началом вызываются корональными выбросами масс, бури с постепенным началом вызываются высокоскоростными потоками солнечного ветра, истекающими из корональных дыр. В то же время собственно физический механизм взаимодействия солнечных агентов с магнитосферой Земли, по-видимому, одинаков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Наговицын Ю.А.* Солнечная и геомагнитная активность на большой временной шкале: реконструкции и возможности для прогнозов // Письма в астроном. журн. Т. 32. № 5. С. 382–391. 2006.
- *Обридко В.Н., Гольшев С.А., Левитин А.Е.* Связь структуры крупномасштабного магнитного поля в циклах солнечной активности со структурой ММП, оказывающей влияние на геомагнитную активность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 4. С. 449–452. 2004.
- *Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д.* Некоторые аномалии эволюции глобальных и крупномасштабных магнитных полей на Солнце как предвестники нескольких предстоящих невысоких циклов // Письма в астроном. журн. Т. 35. № 3. С. 38–44. 2009.
- *Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., Лившиц И.М., Аскеров А.Б.* Связь контраста корональных дыр с характеристиками солнечного ветра // Астроном. журн. Т. 86. № 3. С. 1125–1132. 2009.
- *Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., Лившиц И.М.* Открытые магнитные поля на Солнце и характеристики солнечного ветра у Земли // Астроном. журн. Т. 88. № 3. С. 313–320. 2011.
- Coronal hole history (since late October 2002) [http://www.solen.info/solar/coronal\\_holes.html](http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html)
- *Echer E., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., Prestes A., Vieira L.E.A., dal Lago A., Guarnieri F.L., Schuch N.J.* Long-term correlation between solar and geomagnetic activity // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 66. № 12. P. 1019–1025. 2004.
- *Feynman J.* Geomagnetic and solar wind cycles, 1900–1975 // J. Geophys. Res. V. 87. P. 6153–6162. 1982.
- *Gonzalez W.D., Gonzalez A.I.C., Tsurutani B. T.* Dual-peak solar cycle distribution of intense geomagnetic storms // Planet. Space Sci. V. 38. P. 181–187. 1990.
- *Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Xie H., Mäkelä P., Vourlidas A., Howard R. A.* A Catalog of Halo Coronal Mass Ejections from SOHO // Sun and Geosphere. V. 5. № 1. P. 7–16. 2010.
- *Kishcha P.V., Dmitrieva I.V., Obridko V.N.* Long-term variations of the solar-geomagnetic correlation, total solar irradiance, and northern hemispheric temperature (1868–1997) // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 61. № 11. P. 799–808. 1999.
- *Legrand J.P., Simon P.A.* Ten cycles of solar and geomagnetic activity // Solar Phys. V. 70. № 1. P. 173–195. 1981.
- *Legrand J.P., Simon P.A.* Some solar cycle phenomena related to the geomagnetic activity from 1868 to 1980. P. 1 – The shock events, or the interplanetary expansion of the toroidal field // Astron. Astrophys. V. 152. № 2. P. 199–204. 1985.
- *Legrand J.P., Simon P.A.* Solar cycle and geomagnetic activity: a review for geophysicists. P.2. The solar sources of geomagnetic activity and their links with sunspot cycle activity // Ann. Geophysicae. V. 7. № 6. P. 579–593. 1989.
- *Obridko V.N., Shelting B.* Cyclic variation of the global magnetic field indices // Solar Phys. V. 137. № 1. P. 167–177. 1992.
- *Obridko V.N., Shelting B.D.* Structure and Cyclic Variations of Open Magnetic Fields in the sun // Solar Phys. V. 187. № 3. P. 185–205. 1999.
- *Obridko V.N., Golyshev S.A., Levitin A.E.* Secular and cycle variations of the IMF Bz component and some associated geophysical effects, SOLSPA 2001 Euroconference: Solar Cycle and Space Weather, 24–29 September 2001, Vico Equense (Italy). Proc. published in ESA SP Series (SP-477). P. 404–407. 2002.
- *Robbrecht E., Berghmans D.* Automated recognition of coronal mass ejections (CMEs) in near-real-time data // Astron. Astrophys. V. 425. № 7. P. 1097–1106. 2004.
- *Richardson I.G., Cane H.V., Cliver E.W.* Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972–2000) // J. Geophys. Res. V. 107. № A8. P. 1187–1200. 2002.
- *Sargent H.H.* Recurrent geomagnetic activity - Evidence for long-lived stability in solar wind structure // J. Geophys. Res. V. 90. P. 1425–1428. 1985.
- *Schwenn R.* Solar wind sources and their variations over the solar cycle // Space Sci. Rev. V. 124. № 1–4. P. 51–76. 2006.
- *Simon P.A., Legrand J.P.* Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. I - The contributions to geomagnetic activity of shock waves and of the solar wind. II – The solar sources of geomagnetic activity and their links with sunspot cycle activity // Ann. Geophysicae. V. 7. № 6. P. 565–593. 1989.
- *Svalgaard L.* Geomagnetic activity: Dependence on solar wind parameters / Coronal holes and high speed wind streams in Coronal Holes and High Speed Wind Streams. Ed. J. B. Zirker. Boulder: Colorado Ass. U. Press. P. 371–441. 1977.
- *Tlatov A.G., Makarov V.I.* Indices of solar activity in minimum of sunspot cycles // Largescale Structures and their Role in Solar Activity ASP Conference Series. V. 346. Proc. Conf. held 18–22 October, 2004 in Sunspot, New Mexico, USA. Ed. K. Sankarasubramanian, M. Penn and A. Pevtsov. P. 415. 2005.
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., Tang F., Arballo J.K., Okada M.* Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle // J. Geophys. Res. V. 100. № A11. P. 21717–21734. 1995.
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C. et al.* Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review // J. Geophys. Res. V. 111. № A7. A07S01. P. 11107–11132. 2006.
- *Venkatesan D., Shukla A.K., Agrawal S.P.* Cosmic ray intensity variations and two types of high speed solar stream s // Solar Phys. V. 81. P. 375–381. 1982.
- *Venkatesan D., Ananth A.G., Graumann H., Pillai S.* Relationship between solar and geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 96. P. 9811–9813. 1991.
- *Wang Y.M., Lean J., Sheeley N.R.* The long-term variation of the Sun's open magnetic flux // Geophys. Res. Lett. V. 27. № 4. P. 505–508. 2000.