

УДК 523.62-523.98

СТАТИСТИКА ИЗОЛИРОВАННЫХ И СЛОЖНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ ПО МАТЕРИАЛАМ БАЗЫ ДАННЫХ “АРЕВ” ЗА 23-Й ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2013 г. И. С. Веселовский^{1,2}, А. Т. Лукашенко¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, г. Москва

²Институт космических исследований РАН, г. Москва

e-mail: veselov@dec1.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 30.07.2012 г.

После доработки 28.01.2013 г.

Развитие геомагнитных бурь контролируется в основном внешними гелиосферными причинами, которые, в свою очередь, определяются условиями на Солнце. В зависимости от них возможно изолированное, повторное, многократное или турбулентное возмущение магнитосферы. Большинство геомагнитных бурь имеет сложный характер развития и характеризуется существованием одного или нескольких побочных экстремумов до или после главного. Связано это в основном с наложением друг на друга отдельных возмущений, тесно следующих от Солнца одно за другим в гелиосфере, либо с внутренним строением и динамикой возмущений еще в самой короне. Для выявления статистики по одиночным и кратным возмущениям магнитосферы был проведен анализ геомагнитных бурь из обширной базы данных “АРЕВ” за 23-й цикл солнечной активности, сгруппированных в 227 событий. Результаты представлены в виде гистограмм, графиков, таблиц и эмпирических формул для общего числа интенсификаций во всех событиях, а также в зависимости от разных фаз развития, амплитуды и длительности геомагнитных бурь.

DOI: 10.7868/S0016794013050167

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие геомагнитных бурь контролируется в основном внешними гелиосферными причинами, которые, в свою очередь, определяются условиями на Солнце [Акасофу и Чепмен, 1975; Loewe and Prölss, 1997]. В результате могут наблюдаться однократные (34.4% согласно приведенной далее статистике), двукратные (24.2%) и множественные (41.4%) интенсификации геомагнитного возмущения. Рассматривать их как отдельные геомагнитные бури или нет – зависит от выбранных критериев. Несмотря на ряд исследований, вопрос о статистике одиночных и множественных геомагнитных возмущений не был, по-видимому, ранее достаточно систематически рассмотрен в литературе. Цель данного сообщения состоит в частичном восполнении этого пробела.

Термин “магнитная буря” (Magnetische Ungewitter) впервые был введен Гумбольдтом в 1808 г. как обозначение периода внезапного понижения горизонтальной компоненты H геомагнитного поля, измеряемого на поверхности Земли. На рубеже XIX и XX вв. были приведены аргументы в пользу того, что геомагнитные бури вызываются облаками заряженных частиц, испускаемыми Солнцем. Эта гипотеза позднее легла в основу предположения, что понижение горизонтальной

составляющей геомагнитного поля в течение главной фазы бури происходит из-за текущих вблизи Земли электрических токов, подпитываемых такими заряженными частицами. В базовых работах Чепмена и Ферраро начала 1930-х годов [Chapman and Ferraro, 1930] полагалось, что за бури ответственны транзитные квазинейтральные потоки испускаемых Солнцем ионов и электронов. Когда такой поток достигает Земли, заряженные частицы проникают в магнитосферу и дрейфуют вокруг Земли, создавая кольцевой ток, поле которого вблизи земной поверхности противоположно основному направлению геомагнитного поля [Daglis et al., 1999]. В дальнейшем было установлено существование, наряду с транзитными, и постоянно истекающего из солнечной короны потока плазмы – солнечного ветра. Воздействие кольцевого тока может быть количественно выражено через широко используемый индекс Dst (disturbance storm time), определяемый на основе измерений на опорных низкоширотных станциях.

Как правило, в литературе рассматривались бури с одним минимумом Dst , которые, согласно классическому описанию, состоят из главной фазы (фазы нарастания), длящейся от начала понижения индекса Dst до достижения им пикового значения, и периода восстановления. Однако в

ряде работ [Сизова, 1976; Ковалевский и др., 1978; Kamide et al., 1998; Richardson et al., 2008; Zhang et al., 2008; Ермолаев и др., 2010] были предприняты попытки также рассмотреть бури с более сложным течением. Так, в публикации Ковалевского и др. [1978] отмечалось, что классический тип вариации *Dst*-индекса представляет собой явление сравнительно редкое, чаще встречаются 2–4-разовые усиления кольцевого тока, и что в *Dst* могут наблюдаться периоды сильных и продолжительных понижений (>100 нТл), дополнительно изрезанные слабыми и кратковременными понижениями (<50 нТл). Также Ковалевским и др. [1978] была осуществлена попытка классификации геомагнитных возмущений по числу и относительной глубине составляющих их минимумов. В работе Ермолаева и др. [2010] исследовалась геоэффективность различных крупномасштабных типов солнечного ветра, с учетом в статистике, в отличие от более ранних публикаций (см., например, [Ермолаев и др., 2007а, б]), неглубоких (от -50 до -60 нТл) бурь, в том числе и с немонотонным развитием.

Частный вариант сложных геомагнитных бурь (т.е. бурь, включающих более одного минимума *Dst*) был рассмотрен Kamide et al. [1998]. Авторами было выделено 1252 события, приходившихся на период с 1957 по 1991 гг. Эти бури были ими подразделены на три класса по интенсивности, а затем бури каждого класса были разбиты на типы в зависимости от отсутствия (1-й тип) или наличия (2-й тип) дополнительного минимума на фазе нарастания. Принадлежность ко 2-му из типов устанавливалась по следующим критериям: во-первых, восстановление после первого понижения не должно превышать 90% от его глубины (в противном случае минимумы рассматривались как отдельные бури); во-вторых, промежуток между минимумами должен превышать 3 ч. Авторы получили, что дополнительный минимум на фазе нарастания имелся у 56% бурь из их списка с $-50 \geq Dst > -100$ нТл и у 67% бурь с $Dst \leq -100$ нТл.

Дальнейшее развитие исследование Kamide et al. [1998] получило в работах [Richardson et al., 2008; Zhang et al., 2008]. В первой из них на основе рассмотрения ряда отдельных бурь 23-го цикла солнечной активности было показано, что использованная в работе [Kamide et al., 1998] классификация является чрезмерно упрощенной, и отмечалось, что в общем случае профиль *Dst* может носить достаточно сложный характер и включать многократные понижения. В [Zhang et al., 2008] был произведен статистический анализ бурь со сложным развитием. При этом авторами рассматривались исключительно большие бури ($Dst \leq -100$ нТл), которые, представляя собой достаточно редкое явление, в большинстве случаев

значительно отстоят друг от друга по времени. Выделение самих бурь, а также главных и побочных минимумов осуществлялось при помощи автоматических алгоритмов. Всего было отобрано 90 бурь за 1996–2006 гг. Локальные минимумы, обозначенные термином “углубление” или “дип” (dip), определялись в [Zhang et al., 2008] по выполнению условий

$$\begin{cases} D_i - D_{i-1} < 0 \\ D_{i+1} - D_i > 0, \end{cases}$$

где D — значение *Dst*, а индекс i указывает момент времени. Поскольку наибольший интерес представляют сравнительно выраженные минимумы, было введено дополнительное условие на превышение порога глубины в 14.5 нТл относительно предшествующего локального максимума интенсивности. Минимумы, удовлетворяющие этому условию, именовались “большими дипами” (major dips). Помимо величины порога количество выявляемых “углублений” также зависит от сглаженности профиля *Dst*. Авторы учитывали локальные минимумы на профилях, предварительно подвергнутых сглаживанию через фильтр шириной 3 ч, что аналогично условию Kamide et al. [1998] о трехчасовом интервале между минимумами. Еще одним условием было нахождение “дипа” в пределах ± 24 ч от момента главного минимума бури.

Можно отметить, что при таком подходе более эффективно учитываются локальные минимумы на фазе нарастания, когда понижения в *Dst* происходят, как правило, быстро и превышение порога в 14.5 нТл для приблизительно визуально одинаковых неровностей профиля ожидаемей, и менее — на фазе восстановления, которая, к тому же, в случае глубоких минимумов может занимать существенно больше 24 ч.

Согласно полученным в работе [Zhang et al., 2008] результатам, 1 побочный минимум, превышающий указанный порог, имелся в 49% событий, в 17% случаев наблюдалось 2 или более минимумов, в 24% случаев побочные минимумы отсутствовали. Подразделения минимумов в зависимости от положения (до или после главного) не проводилось. В работе также были исследованы условия в межпланетном магнитном поле (ММП), порождающие бури со сложным развитием.

Нами также было проведено исследование с целью выявления статистики одиночных и кратных возмущений магнитосферы, однако на основе существенно отличного подхода. Для этого по материалам базы данных “АРЕV” нами были составлены таблицы геомагнитных возмущений. Возмущения *Dst* от начала на уровне -10 нТл (или выше) до восстановления до приблизительно того же уровня рассматривались как единые события независимо от числа и характера входящих в них понижений *Dst*.

2. СОСТАВЛЕНИЕ СПИСКА ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

База данных “АРЕВ” (<http://dbserv.sinp.msu.ru/apev/index.html>) представляет собой перечень дней возмущений магнитосферы со средним значением Ap -индекса за день, превышающим 20, охватывающий период с 1997 по 2009 гг. В числе прочего база включает представленные в графическом виде временные профили ключевых геомагнитных параметров (индексы Ap и Dst), параметров солнечного ветра (скорость V , плотность n и температура T) и ММП (B , B_x , B_y , B_z в GSM), наблюдавшихся в окрестности продолжительностью несколько дней вокруг момента включенного в базу события. Так как при составлении базы “АРЕВ” за основу брался индекс Ap и сплошного ряда данных по Dst в ней нет, то, в виду неоднозначности связи этих двух индексов, в некоторых случаях имелись не все необходимые данные. В первую очередь это относится к датам окончания возмущений.

При формировании нашего списка мы руководствовались следующими критериями. Нами отбирались события, минимальные значения индекса Dst в которых превосходили порог в -40 нТл. За начало события считалось время начала понижения Dst от уровня -10 нТл (или выше); за момент окончания — время сравнительно стабильного выхода Dst на уровень -10 нТл; за время главного минимума — промежуток, когда значение Dst минимально (в случае наличия нескольких одинаковых по глубине минимумов предпочтение отдавалось первому из них). В качестве побочных учитывались достаточно выделяющиеся минимумы также со значениями $Dst \leq -40$ нТл. Минимумы отбирались визуально, а не с помощью компьютерного алгоритма, что, как справедливо было отмечено Zhang et al. [2008], в значительной степени носит субъективный характер. В будущем желательна автоматизация процесса и выработка четких критериев классификации. Тем не менее, предварительный визуальный анализ также представляется полезным как помогающий заложить основу для выработки таких критериев.

Таким образом, согласно нашей классификации одно событие может являться как изолированным понижением Dst , так и бурей со сложным характером геомагнитного возмущения, а также может представлять собой результат наложения нескольких последовательно идущих в гелиосфере возмущений, когда следующее из них приходит прежде, чем Dst -индекс успевает восстановиться после предыдущего. Примеры событий приведены далее.

В итоге нами были составлены таблицы геомагнитных возмущений за промежуток с 1997 по 2009 гг., которые включают, в частности, следующие данные:

1. N — номер события в текущем списке;
2. “АРЕВ” — номера изображений из каталога “АРЕВ”, содержащих соответствующие временные профили;
3. Начало события (эти и перечисленные далее даты приводятся с точностью до часа);
4. Окончание события;
5. Даты главного минимума и побочных интенсификаций;
6. n_1 — число интенсификаций на фазе нарастания;
7. n_2 — число интенсификаций на фазе восстановления;
8. n_{sum} — суммарное число интенсификаций (вычисляемое по формуле $n_1 + n_2 + 1$);
9. $|Dst|$ — амплитуды входящих в событие минимумов в порядке их следования;
10. $T_{1/2}$ — длительность бури (ч) на уровне ниже $Dst/2$ (считается продолжительность непрерывного интервала, охватывающего главный минимум);
11. $t_{1/2}$ — длительность фазы нарастания (ч) (считается от начала события до достижения главного минимума);
12. $\tau_{1/2}$ — длительность фазы восстановления (ч) (считается от конца главного минимума до окончания события).

Таблицы в настоящее время доступны в сети Интернет на сайте НИИЯФ МГУ по адресу <http://smdc.sinp.msu.ru/index.py?nav=apev/multi-dip/index>.

Всего указанным образом нами было выделено 227 событий. Распределение событий по глубине минимумов согласно классификации, аналогичной классификации бурь по Dst , предложенной ранее в [Loewe and Prölss, 1997], выглядит следующим образом:

- слабые (weak, от -30 нТл (согласно нашим критериям от -40 нТл) до -50 нТл) — 39 событий;
- умеренные (moderate, от -50 нТл до -100 нТл) — 118 событий;
- сильные (strong, от -100 нТл до -200 нТл) — 54 события;
- очень сильные (severe, от -200 нТл до -350 нТл) — 12 событий;
- экстремальные (great, ниже -350 нТл) — 4 события.

Более детальная сводка по числам событий в зависимости от их интенсивности приведена в таблице 1.

3. ПРИМЕРЫ СОБЫТИЙ

$N1$ (АРЕВ 1, см. рис. 1а). Событие было вызвано одиночным магнитным облаком типа SN. В результате этого развитие бури было прервано на фазе восстановления примерно через сутки после

Таблица 1. Число событий в зависимости от их амплитуды

Dst	Кол-во событий													Всего
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
40–79	9	10	14	14	11	4	17	9	12	14	6	7	1	128
80–119	8	5	5	8	3	8	3	3	6	3	–	–	–	52
120–159	1	4	1	4	2	2	3	2	4	1	–	–	–	24
160–199	–	–	1	1	2	2	–	1	–	–	–	–	–	7
200–239	–	2	1	2	1	–	–	–	1	–	–	–	–	7
240–279	–	–	–	–	1	–	–	–	1	–	–	–	–	2
280–319	–	–	–	2	1	–	–	–	–	–	–	–	–	3
320–359	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
360–399	–	–	–	–	1	–	1	1	–	–	–	–	–	3
400–439	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	1
Σ за год	18	21	22	31	22	16	25	16	24	18	6	7	1	

ее внезапного начала, т.е. через 20 ч после достижения максимального возмущения $Dst \sim -77$ нТл. Причина на Солнце двойная: прохождение корональной дыры через центральный меридиан и эруптивное событие (исчезновение волокна, вспышка и корональный выброс массы) 6–7 января.

N152 (426–432, рис. 1б). Солнечная активность в виде множества эруптивных событий была сосредоточена вблизи центра видимого диска Солнца к северу от гелиосферного токового слоя, который был близок к меридианальному расположению. Такая ориентация благоприятствовала формированию четко выраженной области взаи-

модействия быстрых потоков из южной корональной дыры с медленным солнечным ветром. Эта картина была полностью нарушена мощнейшими эруптивными протуберанцами, вспышками и корональными выбросами массы, которые носили множественный характер. Последовательное усиление длительной бури в течение двух суток 29–30 октября было обусловлено суперпозицией трех основных интенсификаций при благоприятной ориентации межпланетного электрического поля в сжатом слое и двух магнитных облаках NS и SN типа. Такая ситуация уникальна. Фаза восстановления 31 октября носит типичный характер.

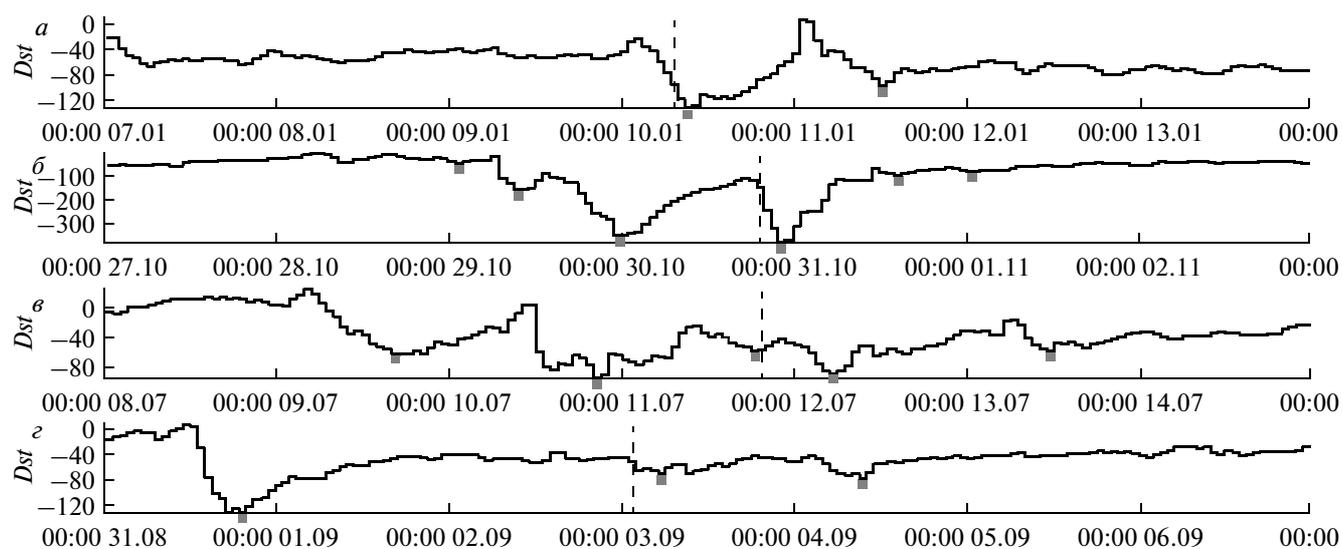


Рис. 1. Примеры профилей Dst событий 23-го цикла солнечной активности. Минимумы помечены квадратиками, a – “APEV 1” (1997 г.); b – “APEV 428” (2003 г.); e – “APEV 546” (2005 г.); z – “APEV 558” (2005 г.).

Таблица 2. Числа интенсификаций на фазе нарастания геомагнитных возмущений

n_1	Кол-во событий													
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Всего
0	14	16	14	20	13	8	9	12	14	14	6	6	1	147
1	2	2	6	4	5	3	8	1	7	4	—	1	—	43
2	1	3	1	4	1	1	2	1	2	—	—	—	—	16
3	1	—	—	2	2	4	3	2	—	—	—	—	—	14
4	—	—	1	1	—	—	2	—	—	—	—	—	—	4
5	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	1
6	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	1
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	1

Таблица 3. Числа интенсификаций на фазе восстановления геомагнитных возмущений

n_2	Кол-во событий													
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Всего
0	7	8	11	19	9	2	7	5	5	12	5	7	1	98
1	10	6	4	10	7	8	5	3	6	6	1	—	—	66
2	1	5	3	—	3	2	5	2	6	—	—	—	—	27
3	—	1	3	2	1	—	3	4	4	—	—	—	—	18
4	—	—	—	—	1	2	3	2	2	—	—	—	—	10
5	—	1	—	—	1	—	1	—	1	—	—	—	—	4
6	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	1
7	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	1
8	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	1
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1

N185 (544–549, рис. 1а). Длительный умеренно-возмущенный период, обусловленный множественными небольшими плазменно-магнитными облаками вблизи гелиосферного токового слоя. Солнечная активность в виде эруптивных вспышек и протуберанцев сосредоточена вблизи центрального меридиана в южном полушарии. Она производила неоднократные отклонения гелиосферного токового слоя к северу и нарушала его односвязность, образуя иногда разрывы и не очень сильные ударные волны, которые распространялись в гелиосфере.

N190 (556–560, рис. 1б). Возмущенный период длительностью несколько дней обусловлен серией солнечных эруптивных вспышек, корональных выбросов массы и волокон на фоне прохождения вдоль секторной границы с многократными отклонениями и пересечениями ее на орбите Земли на следующем обороте Солнца.

Как видно из профилей Dst на рис. 1, в каждом из перечисленных событий согласно установленным нами критериям наблюдались дополнительные интенсификации.

4. АНАЛИЗ ДАННЫХ

По составленным описанным образом спискам событий нами был проведен анализ распределений по числам интенсификаций на фазах нарастания и восстановления геомагнитных возмущений, а также по суммарному числу интенсификаций (см. таблицы 2–4 и рис. 2–3).

Средние значения по всем 227 событиям составили 0.670 для n_1 и 1.167 для n_2 , а максимальные — 8 и 10 соответственно. Дополнительные интенсификации на фазе нарастания и фазе восстановления имелись, соответственно, у 35.2% и 56.8% событий.

Таблица 4. Суммарное число интенсификаций

n_{sum}	Кол-во событий													Всего
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
1	7	6	8	16	6	2	4	3	4	10	5	6	1	78
2	7	7	4	5	6	5	4	3	6	6	1	1	—	55
3	2	4	3	3	4	1	2	2	3	2	—	—	—	26
4	1	2	4	4	1	1	4	5	5	—	—	—	—	27
5	—	1	1	2	1	2	2	2	3	—	—	—	—	14
6	1	—	1	—	2	1	4	—	1	—	—	—	—	10
7	—	—	—	—	—	1	4	1	1	—	—	—	—	7
8	—	1	—	1	1	2	—	—	—	—	—	—	—	5
9	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	1
10	—	—	—	—	—	1	—	—	1	—	—	—	—	2
11	—	—	1	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	2
Σ за год	37	53	63	69	68	68	107	52	83	28	7	8	1	

Дополнительные интенсификации в целом имелись у 65.6% возмущений. Из приведенных таблиц видно, что в годы максимума и на спаде цикла солнечной активности доля событий со множественными понижениями Dst была выше. Суммарное число интенсификаций за все годы составило 644, а среднее их число на одно событие — 2.837.

Для величин Dst , n_1 , n_2 , n_{sum} , $T_{1/2}$, $t_{1/2}$ и $\tau_{1/2}$ нами был выполнен подсчет взаимных корреляций. Для этого из 227 событий были предварительно отобраны $m = 188$, по которым имелись все перечисленные данные. Коэффициент ранговой кор-

реляции Спирмена рассчитывался по формуле для случая наличия совпадающих наблюдений

$$r_s = \frac{m(m^2 - 1) - 6 \sum_{i=1}^n (R_i^X - R_i^Y)^2 - \Delta_X - \Delta_Y}{\sqrt{[m(m^2 - 1) - 2\Delta_X][m(m^2 - 1) - 2\Delta_Y]}}$$

где $X = (X_1, \dots, X_m)$, $Y = (Y_1, \dots, Y_m)$ — сравниваемые выборки,

$$\Delta_X = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^q u_j^X \left((u_j^X)^2 - 1 \right),$$

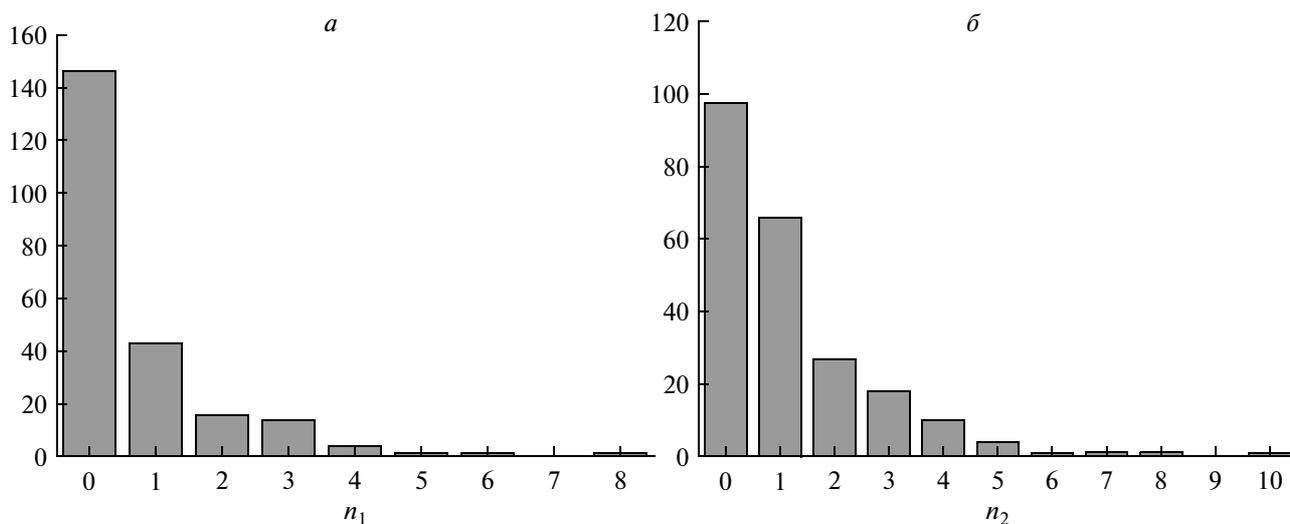


Рис. 2. Итоговое распределение количества событий по числу интенсификаций: а — на фазе нарастания; б — на фазе восстановления.

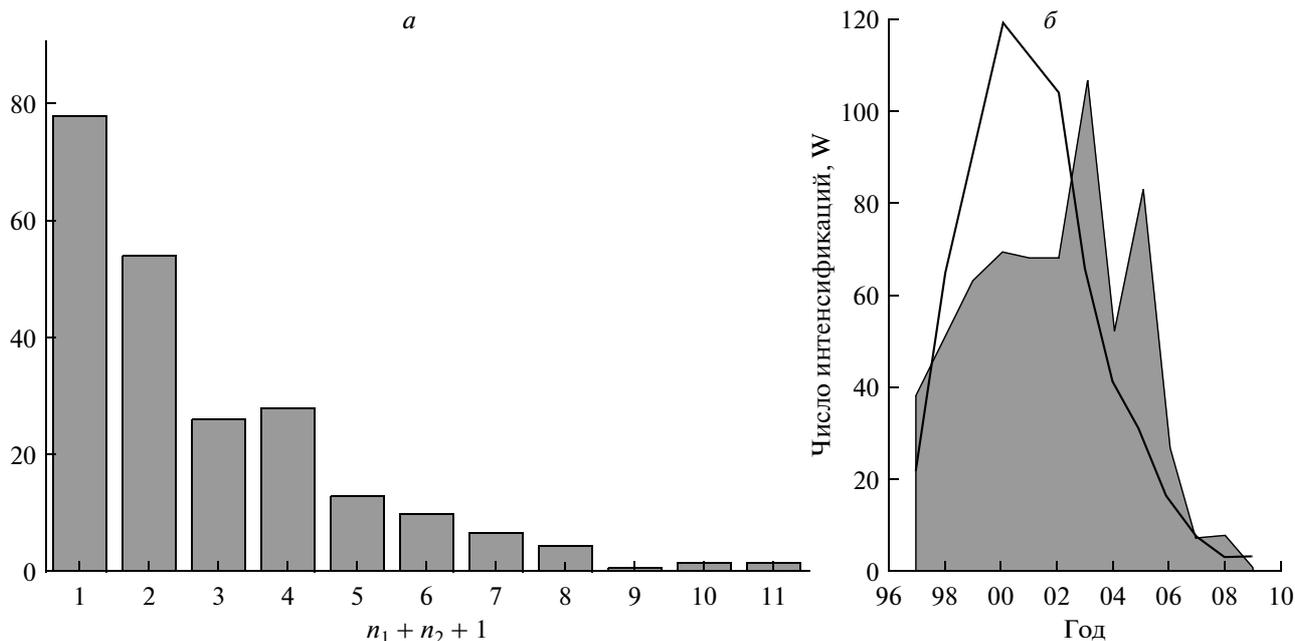


Рис. 3. Распределение количества событий по суммарному числу интенсификаций (а); суммы чисел интенсификаций по годам, черная линия поверх – годовые числа Вольфа (б).

q – количество связей в выборке X ; u_1^X, \dots, u_q^X – их размеры; R_i^X – ранг X_i среди наблюдений выборки X , т.е. номер места, занимаемого величиной X_i в вариационном ряду $X_{(1)} \leq \dots \leq X_{(m)}$, при этом ранги по связкам усредняются. Связкой размера v называется подпоследовательность вариационного ряда, такая что

$$X_{(1)} \leq \dots < \underbrace{X_{(k_1)} = \dots = X_{(k_2)}}_v < \dots \leq X_{(m)},$$

$v = k_2 - k_1 + 1$. Δ_Y и R_i^Y определяются аналогично.

Подсчет показал, что наиболее значимая корреляция (если не считать естественно ожидаемых связей между n_1 и n_{sum} и между n_2 и n_{sum}) наблюдается между n_1 и $t_{1/2}$, а также между n_2 и $\tau_{1/2}$. Коэффициенты корреляции Спирмена для этих двух пар величин равны, соответственно, $r_s = 0.64$ и 0.69 (умеренная корреляция). Также можно отметить умеренную корреляцию между n_{sum} и Dst ($r_s = 0.51$). При $n_{sum} \geq 3$ четкой зависимости Dst от n_{sum} нет, однако для начальных значений суммарного числа интенсификаций наблюдается рост среднего значения Dst с его увеличением (см. табл. 5). Числа n_1 и n_2 демонстрируют между собой лишь слабую корреляцию ($r_s = 0.34$). Более подробные сведения представлены на домашней странице одного из авторов (А.Т.Л.) по адресу <http://dec1.sinp.msu.ru/~lukashenko/>.

Связь между n_1 и $t_{1/2}$ можно приблизить линейной зависимостью по методу наименьших квадратов (рис. 4):

$$n_1 = -0.2714 + 0.02327t_{1/2}.$$

Связь между n_2 и $\tau_{1/2}$ аналогичным образом аппроксимируется зависимостью (рис. 5)

$$n_2 = -0.7138 + 0.01807\tau_{1/2}.$$

Среднее значение длительности фазы нарастания $t_{1/2}$ по полученным нами данным составило 38.0 ч, стандартное отклонение – 41.2 ч. Средняя длительность фазы восстановления $\tau_{1/2}$ составила 96.6 ч, стандартное отклонение – 58.0 ч. Анализ распределений событий по длительностям указанных времен показал, что наилучшим образом они приближаются логнормальным распределением

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}.$$

Таблица 5. Усредненные значения Dst в главном минимуме при различных суммарных числах интенсификаций

n_{sum}	$\langle Dst \rangle$
1	62
2	81
≥ 3	129

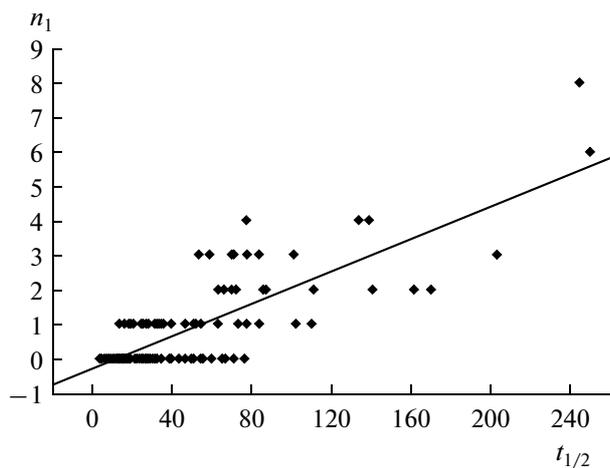


Рис. 4. График, иллюстрирующий связь между n_1 и $t_{1/2}$.

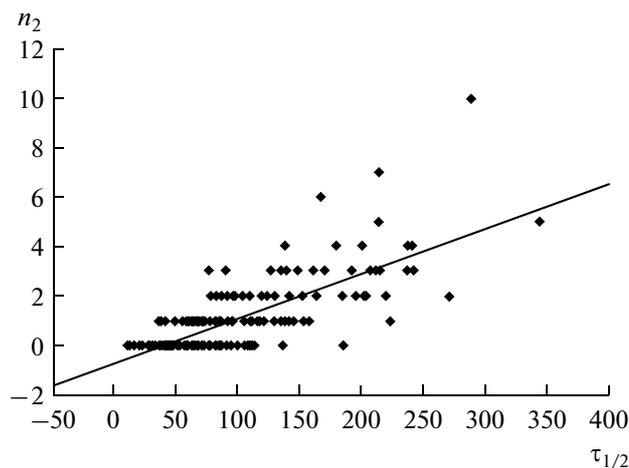


Рис. 5. График, иллюстрирующий связь между n_2 и $\tau_{1/2}$.

Параметры распределения искались методом минимума статистики хи-квадрат:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(n_j - N'p_j)^2}{N'p_j} \sim \chi_{k-r-1}^2,$$

где N' — суммарное число рассматриваемых событий, n_j — число событий в j -м временном интервале, p_j — ожидаемая вероятность попадания в j -й интервал, k — общее число интервалов, r — количество

оцениваемых параметров ($r = 2$). Для распределения по длительности времен нарастания параметры $\mu = 3.220$, $\sigma = 0.958$; при этом $\chi^2 = 8.21$, число степеней свободы $df = k - r - 1 = 9$; уровень значимости $p = 0.514$. Распределение же по длительности времен восстановления можно аппроксимировать логнормальным распределением с $\mu = 4.397$, $\sigma = 0.595$ лишь грубо из-за наличия небольшого дополнительного горба в районе 200–240 ч. Соответствующие гистограммы приведены на рис. 6 и 7.

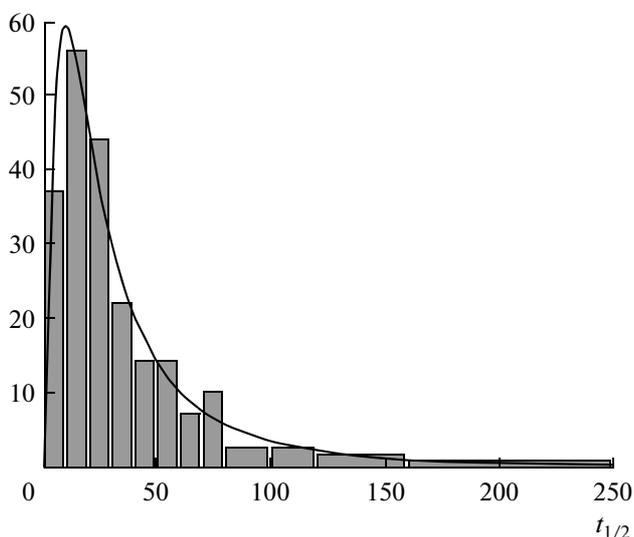


Рис. 6. Гистограмма распределения геомагнитных возмущений по длительности фазы нарастания $t_{1/2}$. Данные имелись по $N' = 225$ событиям. Минимальное значение $\tau_{1/2}$ составило 4 ч, максимальное — 250 ч. Изначально было взято 25 интервалов по 10 ч; впоследствии часть из них была объединена с тем, чтобы ожидаемое число попаданий в каждый интервал $N'p$ превышало 5.

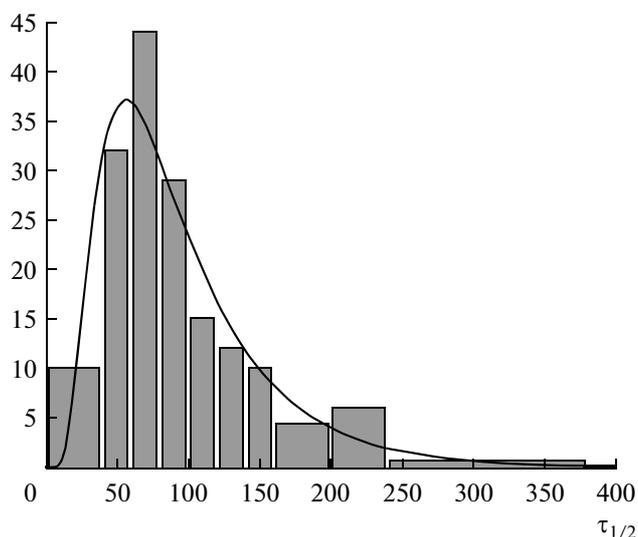


Рис. 7. Гистограмма распределения геомагнитных возмущений по длительности фазы восстановления $\tau_{1/2}$. Данные имелись по $N' = 188$ событиям. Минимальное значение $\tau_{1/2}$ составило 12 ч, максимальное — 345 ч по $N' = 188$ событиям и свыше 437 ч (точное значение неизвестно) по всем 227 событиям. Изначально было взято 19 интервалов по 20 ч; впоследствии часть из них была объединена с тем, чтобы ожидаемое число попаданий в каждый интервал $N'p$ превышало 5.

Нами также была произведена кластеризация методом k -средних при помощи программного обеспечения Statistica 6.0. В результате события были разбиты по переменным Dst , $T_{1/2}$ и $t_{1/2}$ на три кластера: 1) короткие мощные бури, 2) продолжительные бури невысокой интенсивности, 3) короткие слабые. Бури, относящиеся ко 2-му кластеру, показывают тенденцию к длительному понижению к главному минимуму. Наиболее мощные бури обладают резким началом, однако некоторые из сильных возмущений (с пиковым значением от -100 до -200 нТл) включают предшествующие главному минимуму длительные слабозвозмущенные периоды.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Множественные и одиночные межпланетные возмущения могут возникать на Солнце, в короне и гелиосфере в одном и том же или в различных местах в зависимости от целого ряда условий. С точки зрения возбуждения ими геомагнитных бурь при этом могут представлять наибольший интерес физические процессы в отдельных активных областях и корональных дырах либо в некоторой их совокупности на Солнце. В первом случае проще локализовать и понять основные модельные образы, связанные с изолированными корональными выбросами массы и рекуррентными высокоскоростными потоками солнечного ветра. Во втором случае такая локализация источников более затруднительна, а иногда и вовсе невозможна на основе имеющегося ограниченного наблюдательного материала. Например, помимо хорошо изолированных возмущений известны случаи совместного действия слившихся по пути к Земле выбросов плазмы из одной, двух или даже трех активных областей. Меньше внимания до недавнего времени обращалось на комбинацию частично слившихся друг с другом коротирующих и спорадических возмущений, которые имеют в гелиосфере вид нелинейной суперпозиции высокоскоростных потоков из корональных дыр и транзитов. Наш анализ в этом отношении подтверждает известные выводы о совместной роли нелокальных и нелинейных процессов ([Веселовский и др., 2004; Панасюк и др., 2004]). В итоге получается, что большинство бурь имеет сложный характер развития во времени, а изолированные бури встречаются не так часто.

Изолированные события чаще наблюдаются в минимуме солнечной активности. Мощные геомагнитные возмущения обычно встречаются в максимуме и на спаде цикла солнечной активности. Тогда же выше вероятность сложных событий из-за наложения множественных возмущений и большего их числа на Солнце и по дороге в гелиосфере в этот период времени.

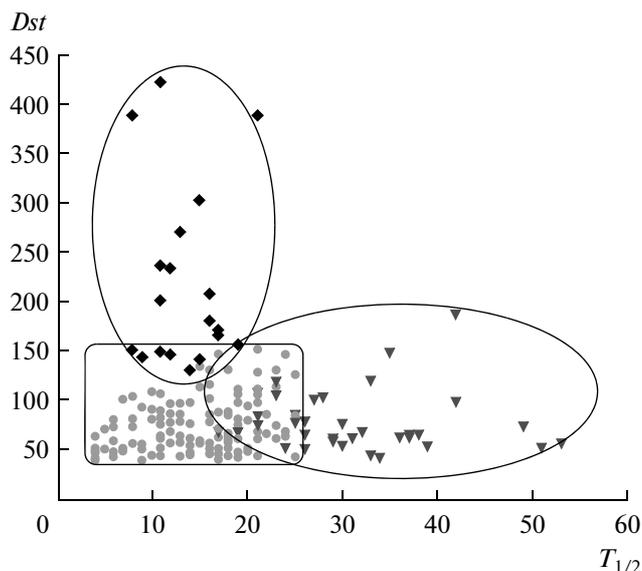


Рис. 8. Связь между Dst и продолжительностью события $T_{1/2}$ на уровне ниже $Dst/2$. Результат кластеризации методом k -средних по переменным Dst , $T_{1/2}$ и $t_{1/2}$. Значки разного типа соответствуют различным кластерам (см. пояснения в тексте): 1 – ромбы, 2 – треугольники, 3 – кружки.

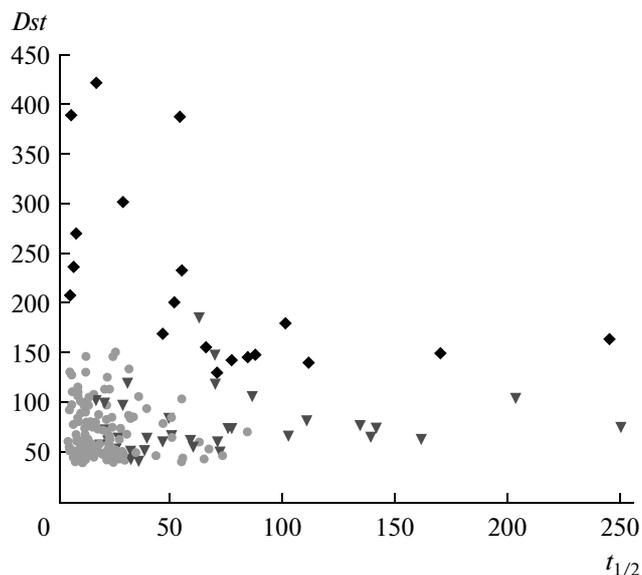


Рис. 9. Связь между Dst и длительностью фазы нарастания $t_{1/2}$. Результат кластеризации методом k -средних по переменным Dst , $T_{1/2}$ и $t_{1/2}$.

Известно, что мощные возмущения на Солнце, в гелиосфере и магнитосфере как правило явления более кратковременные, чем слабые. Было бы неверным утверждать, что в энергетическом балансе на Солнце, в гелиосфере и магнитосфере в целом преобладает вклад отдельных мощных событий. Скорее дело обстоит противоположным

образом. Это обстоятельство следует учитывать на практике, например, при подсчете геомагнитно индуцированного количества переносимых электрических зарядов и их коррозионного воздействия на проводники.

Найденные нами закономерности в виде логнормальных распределений для статистических свойств относительно длительности геомагнитных бурь, по-видимому, отражают статистические свойства солнечного ветра, связанные с нелинейными мультипликативными процессами формирования возмущений в нем (см. [Веселовский и др., 2010]). Вопрос о детальном происхождении такой статистики в данном случае требует дополнительного исследования.

Авторы выражают благодарность Л.З. Бикташ (Сизовой) за полезные замечания.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 13-02-00461.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Т. 2. М.: Мир, 512 с. 1975.
- Веселовский И.С., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Алгебра и статистика солнечного ветра // Космич. исслед. Т. 48. № 2. С. 113–128. 2010.
- Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003 г. // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 453–508. 2004.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // Космич. исслед. Т. 45. № 1. С. 3–11. 2007а.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям, 2 часть // Космич. исслед. Т. 45. № 6. С. 489–498. 2007б.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Относительная частота появления и геоэффективность крупномасштабных типов солнечного ветра // Космические исследования. Т. 48. № 1. С. 3–32. 2010.
- Ковалевский И.В., Шевнин А.Д., Сизова Л.З. Многообразие форм *Dst*-вариации, ее связь с параметрами околоземной среды и оперативный прогноз // Геомагнитная активность и ее прогноз / М.: Наука, 238 с. 1978.
- Сизова Л.З. О распаде кольцевого тока // Солнечный ветер и магнитосфера. М.: ИЗМИРАН, 128 с. 1976.
- Панасюк М.И., Кузнецов С.Н., Лазутин Л.Л. и др. Магнитные бури в октябре 2003 года // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 509–554. 2004.
- Chapman S., Ferraro V.C. A New Theory of Magnetic Storms // Nature. V. 126. P. 129–130. 1930.
- Daglis I.A., Thorne R.M., Baumjohann W., Orsini S. The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay // Rev. Geophys. V. 37. № 4. P. 407–438. 1999.
- Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W., Tsurutani B.T., Brekke A., Masuda S. Two-step development of geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 103. № A4. P. 6917–6921. 1998.
- Loewe C.A., Pröls G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms // J. Geophys. Res. V. 102. № A7. P. 14209–14213. 1997.
- Richardson I.G., Zhang J. Multiple-step geomagnetic storms and their interplanetary drivers // Geophys. Res. Lett. V. 35. Issue 6. CiteID L06S07. 2008.
- Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F. Interplanetary origin of multiple-dip geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 113. № A10. CiteID A00A12. 2008.