

УДК 524.1-352

## СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ С ГЕЛИОДОЛГОТОЙ СОЛНЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

© 2013 г. М. А. Абунина, А. А. Абунин, А. В. Белов, Е. А. Ерошенко,  
А. С. Асипенка, В. А. Оленева, В. Г. Янке

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

e-mail: abunina@izmiran.ru

Поступила в редакцию 13.09.2011 г.

В базе данных по Форбуш-эффектам, созданной в ИЗМИРАН на основе данных мировой сети нейтронных мониторов, собраны все значительные события в галактических космических лучах за последние 55 лет. Для ~800 из этих событий идентифицированы их солнечные источники. Эти события были разделены на пять групп по гелиодолготам ассоциированных рентгеновских солнечных вспышек, и поведение их характеристик изучалось отдельно для каждой из этих групп. Представлено типичное поведение плотности и анизотропии космических лучей для каждой группы. Выявлены характеристики Форбуш-эффектов, более всего зависящие от гелиодолготы источника.

DOI: 10.7868/S0016794013010021

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Непосредственной причиной большинства больших Форбуш-эффектов (ФЭ) является распространяющееся возмущение солнечного ветра, вызванное корональными выбросами масс (СМЕ) [Iucci et al., 1979; Richardson and Cane, 1993; Cane et al., 1994]. Начало этого типа ФЭ обычно совпадает с приходом межпланетной ударной волны и внезапным началом геомагнитной бури (SSC). Возможная корреляция между некоторыми параметрами ФЭ и характеристиками ICME и их солнечных источников, в частности, гелиодолготная зависимость ФЭ, рассматривалась во многих работах [Sinno, 1961; Haurvitz et al., 1965; Barnden, 1973; Iucci et al., 1985, 1986; Cane et al., 1996; Cane, 2000; Belov et al., 2001]. Первое детальное изучение было проведено в работах Iucci et al. [1985, 1986]. Но с тех пор накоплено огромное количество новых данных о событиях на Солнце и в межпланетной среде, что дает новые возможности для исследований. Статистический анализ таких событий требует большого объема данных, поскольку, как отмечалось в публикации [Cane, 2000], ситуация на орбите Земли может быть очень сложной из-за нескольких транзиентных событий, происходящих близко во времени и пространстве (см. также [Burlaga et al., 2003; Gopalswamy et al., 2004]). При взаимодействии же рекуррентных и транзиентных структур бывает трудно разделить ФЭ, обусловленные различными типами возмущений [Crooker and Cliver, 1994; Gonzalez et al., 1996; Cliver and Cane, 1996; Belov, 2009].

Кроме того, почти во всех упомянутых работах анализ ФЭ проводился для относительно корот-

ких периодов и небольшого числа событий, в основном, по данным одного-трех отдельных нейтронных мониторов (НМ). Различие в вариациях скорости счета НМ между разными станциями во время ФЭ определяется свойствами каждой станции, что не позволяет точно характеризовать событие. Из-за различного географического положения, высоты и геомагнитных жесткостей обрезания Форбуш-понижение (ФП) в скорости счета на каждой станции может показывать различную глубину, различный временной профиль и даже разное время начала. Поэтому для анализа лучше использовать характеристики ФЭ, не зависящие от места наблюдения: плотность и анизотропию космических лучей (КЛ), полученные методом глобальной съемки по данным мировой сети НМ [Belov et al., 2005a].

В данной работе мы исследуем только не рекуррентные ФЭ: события, связанные с СМЕ и ассоциированные с солнечными спорадическими источниками. Цель работы – выявить тенденции в поведении анизотропии КЛ, проявляющиеся в зависимости анизотропии от величины ФП, в запаздывании начала ФЭ относительно начала возмущения, в скорости спада интенсивности КЛ на главной фазе ФП – для Форбуш-эффектов, распределенных по различным гелиодолготным группам их источников. Подобные исследования делают КЛ источником информации еще одного типа: они дают дополнительные возможности для локализации солнечного источника межпланетного возмущения; помогают понять, как распространяются возмущения от разных источников, когда и почему они становятся геоэффективными; обес-

Усредненные параметры для всех Форбуш-эффектов с идентифицированными солнечными источниками в различных гелиодолготных секторах за период 1976–2010 гг.

	E91–E46	E45–E16	E15–W15	W16–W45	W46–W91
$A_F$	$2.47 \pm 0.28$	$2.90 \pm 0.23$	$3.00 \pm 0.30$	$2.95 \pm 0.39$	$2.26 \pm 0.26$
$A_{xy_{\max}}$	$1.58 \pm 0.08$	$1.75 \pm 0.07$	$1.81 \pm 0.09$	$2.15 \pm 0.17$	$2.01 \pm 0.16$
$Az_{\text{range}}$	$1.72 \pm 0.11$	$1.94 \pm 0.08$	$1.98 \pm 0.09$	$2.04 \pm 0.11$	$1.92 \pm 0.16$
$D_{\min}$	$-0.56 \pm 0.07$	$-0.57 \pm 0.04$	$-0.66 \pm 0.06$	$-0.81 \pm 0.12$	$-0.60 \pm 0.10$
$D_{\max}$	$0.80 \pm 0.36$	$0.37 \pm 0.02$	$0.49 \pm 0.08$	$0.49 \pm 0.05$	$0.39 \pm 0.02$
$Kp_{\max}$	$5.00 \pm 0.21$	$5.24 \pm 0.17$	$5.73 \pm 0.15$	$5.79 \pm 0.19$	$5.41 \pm 0.21$
$Ap_{\max}$	$59.13 \pm 6.02$	$67.21 \pm 6.52$	$88.43 \pm 6.35$	$92.12 \pm 8.56$	$75.70 \pm 9.80$
$Dst_{\min}$	$-58.0 \pm 5.8$	$-72.0 \pm 6.9$	$-85.5 \pm 5.9$	$-87.9 \pm 8.5$	$-67.2 \pm 6.8$
$B_{\max}$	$15.03 \pm 0.89$	$17.68 \pm 1.13$	$17.91 \pm 0.75$	$17.47 \pm 1.39$	$18.21 \pm 1.33$
$V_{\max}$	$521.7 \pm 19.2$	$569.4 \pm 14.8$	$541.1 \pm 13.6$	$564.0 \pm 18.0$	$597.3 \pm 21.2$
$V_m B_m$	$4.04 \pm 0.31$	$5.13 \pm 0.45$	$5.07 \pm 0.31$	$5.13 \pm 0.56$	$5.52 \pm 0.55$
$t_{\min}$	$24.75 \pm 2.64$	$22.12 \pm 1.71$	$18.06 \pm 1.53$	$13.48 \pm 1.94$	$16.02 \pm 2.55$
$t(D_{\min})$	$12.68 \pm 2.22$	$11.99 \pm 1.51$	$11.16 \pm 1.22$	$9.16 \pm 1.67$	$11.57 \pm 1.93$
$A_F/B$	$0.166 \pm 0.021$	$0.163 \pm 0.012$	$0.156 \pm 0.013$	$0.149 \pm 0.013$	$0.132 \pm 0.014$
$H_{\text{Lon}}$	$-66.725 \pm 1.997$	$-29.963 \pm 0.912$	$0.253 \pm 0.882$	$28.507 \pm 1.042$	$63.915 \pm 2.000$

Примечание. Источники распределены по пяти долготным группам и отстоят на 48 ч до и на 48 ч после друг от друга (всего 344 события).

печивают нас дополнительной информацией для оценки структуры и размеров межпланетных возмущений от разных источников.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Две базы данных, разработанные в ИЗМИРАН, использованы в качестве рабочих инструментов для исследования связей между вспышками на Солнце и Форбуш-эффектами у Земли. Первая база данных [Belov et al., 2005b] содержит информацию по всем рентгеновским вспышкам, зарегистрированным спутниками серии GOES ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SOLAR\\_FLARES/XRAY\\_FLARES/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_FLARES/XRAY_FLARES/)) с осени 1975 г. по настоящее время. Другая база данных [Belov, 2009] включает характеристики ФЭ и межпланетных возмущений. Параметры каждого ФЭ (часовые значения плотности и анизотропии КЛ за пределами магнитосферы) рассчитаны по данным сети НМ методом глобальной съемки (GSM) [Belov et al., 2005a]. Эти параметры являются глобальными характеристиками и не зависят от отдельных детекторов. В нашей базе данных используются результаты для КЛ с жесткостью 10 ГВ, поскольку она близка к эффективной жесткости частиц, регистрируемых нейтронными мониторами. Максимальные значения ФП, время начала ФП, время достижения минимума ФП и продолжительность главной фазы Форбуш-эффекта были оценены для каждого события и введены в базу данных. Максимальные значения

межпланетного магнитного поля (ММП) и скорости солнечного ветра (СВ), а также времена этих максимумов относительно прихода ударной волны, оценивались из OMNI базы данных (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>). База данных ИЗМИРАН включает также максимальные значения составляющих анизотропии КЛ,  $Kp$  и  $Ap$ -индексов геомагнитной активности (<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc/>) для каждого события.

Для анализа отбирались Форбуш-эффекты:

- 1) идентифицированные с солнечными источниками;
- 2) разделенные между собой временным интервалом, по меньшей мере, в 48 ч, чтобы избежать наложения серийных событий, или (когда разделение меньше) с величиной предыдущего ФП  $< 1.5\%$ .

Таких событий в нашей базе за период с 1976 по 2010 гг. набралось 334. Они были разделены на пять групп по гелиодолготным диапазонам их солнечных источников: E91–E46; E45–E16; E15–W15; W16–W45; W46–W91. Для каждой группы определялся ряд параметров, часть которых, использовавшаяся для анализа, представлена в таблице.

Для получения этой таблицы и других обсуждаемых далее результатов использовались свойства и возможности баз данных, позволяющие делать выборки событий по различным параметрам и проводить различные корреляционные и статистические оценки.

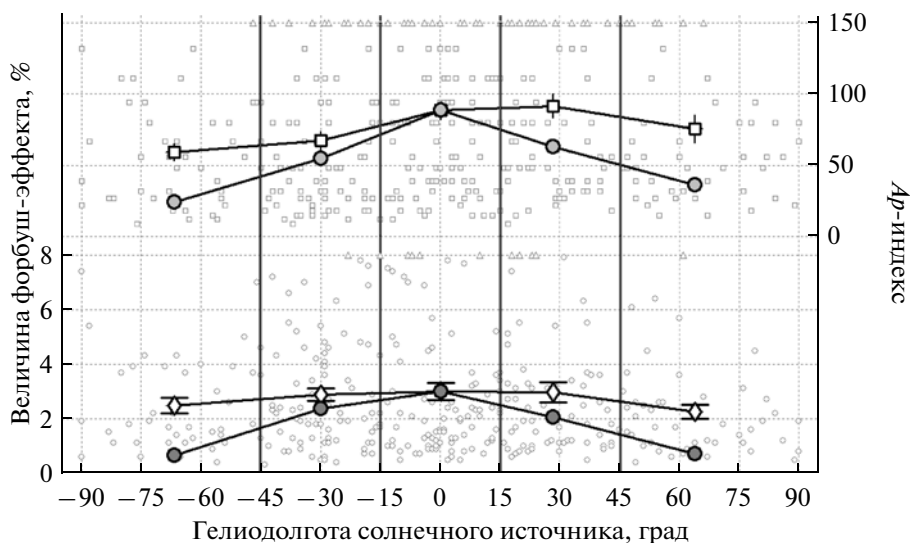


Рис. 1. Зависимость величины ФП и  $A_p$ -индексов геомагнитной активности от долготы солнечного источника. Треугольниками в верхней части рисунков показаны самые большие события с величиной ФП  $>8\%$  и возрастанием  $A_p$ -индекса выше 150 (2 нТл).

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Параметры Форбуш-эффектов для каждой долготной группы солнечных источников, а также характеристики состояния межпланетной среды и солнечного ветра в исследуемые периоды приведены в таблице. Здесь  $A_F$  – величина ФП,  $A_{\text{хуmax}}$  – максимальное значение экваториальной составляющей первой гармоники анизотропии КЛ,  $A_{z_{\text{range}}}$  – диапазон изменения северо-южной составляющей анизотропии,  $D_{\text{min}}$  – максимальное уменьшение плотности КЛ за час,  $D_{\text{max}}$  – максимальное увеличение плотности КЛ,  $Kp_{\text{max}}$ ,  $A_p_{\text{max}}$ ,  $Dst_{\text{min}}$  – максимальные значения индексов геомагнитной активности во время рассматриваемых событий,  $B_{\text{max}}$  – максимальное значение напряженности ММП,  $V_{\text{max}}$  – максимальное значение скорости СВ,  $V_m B_m$  – произведение максимальных значений характеристик межпланетной среды в рассматриваемом возмущении, рассчитываемое по формуле

$$V_m B_m = \frac{V_{\text{max}} B_{\text{max}}}{V_0 B_0}, \quad (1)$$

где  $V_0$  и  $B_0$  параметры невозмущенной межпланетной среды (обычно используются  $V_0 = 400$  км/с, а  $B_0 = 5$  нТл);  $t_{\text{min}}$  – время от начала до минимума плотности в ФП,  $t(D_{\text{min}})$  – время наибольшего часового понижения плотности на главной фазе ФП,  $A_F/B_{\text{max}}$  – отношение амплитуды ФП к максимальной напряженности ММП,  $H_{\text{Lon}}$  – гелиодолгота источника.

Среди отобранных вышеописанным методом событий 99 эффектов оказались из центрального

сектора солнечного диска (E15–W15), 81 – из ближнего восточного (E45–E16), 67 – из ближнего западного (W16–W45), 40 и 47 событий – из удаленного восточного (E91–E46) и удаленного западного (W46–W91) секторов соответственно (рис. 1).

Следует учесть, что из центральной зоны к Земле приходят практически все возмущения, а из других зон только их часть, причем, отфильтровываются самые слабые из выбросов. От дальних долгот приходят только самые большие и мощные ICME. В ближних восточном и западном секторах величины наблюдаемых ФП также несколько завышенные.

Для восточного сектора естественно предположить, что выбросов на каждый градус долготы было столько же, сколько из центральной зоны, но большая их часть прошла восточнее Земли и не оказала влияния на КЛ, приходящие на Землю. Поэтому они не попали в нашу базу данных. По грубой оценке только один из 3-х восточных выбросов оказывает влияние на околоземной солнечный ветер и КЛ около Земли. Учитывая только эти события, мы получаем существенно завышенные оценки эффективности выбросов от источников, удаленных по гелиодолготе. Если бы мы хотели подсчитать средний эффект от восточного выброса, нам бы следовало добавить к 40 наблюдавшимся ФП еще  $99 \times 1.5 - 40 = 109$  событий с нулевой величиной (делаем поправку еще и на то, что этот сектор в 1.5 раза больше по долготе). Для ближневосточного сектора мы, соответственно, добавляем  $99 - 81 = 18$  событий с нулевой величиной.

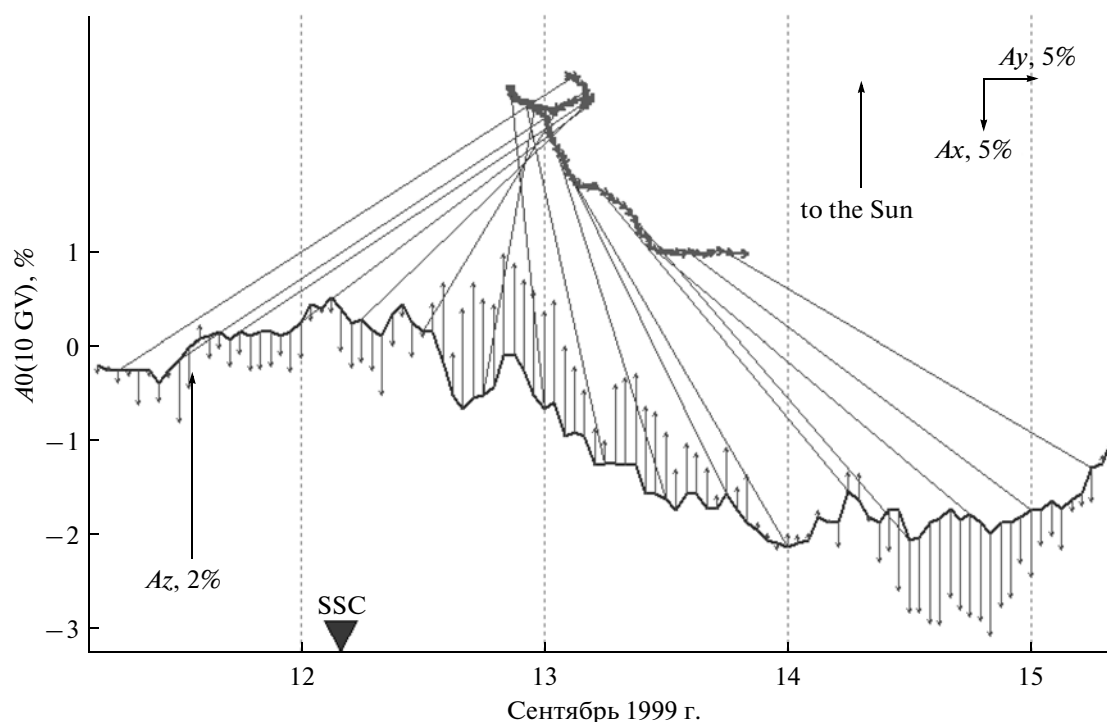


Рис. 2. Поведение плотности и векторной анизотропии КЛ во время ФЭ, обусловленного далеким восточным источником (гелиодолгота ассоциированной вспышки – E53).

Средний эффект для восточного сектора тогда был бы  $40 \times 2.47 / (99 \times 1.5) = 0.67\%$ , для западного сектора –  $47 \times 2.26 / (99 \times 1.5) = 0.72\%$ , для ближнего восточного сектора –  $81 \times 2.90 / 99 = 2.37\%$ , для ближнего западного сектора –  $67 \times 2.95 / 99 = 1.99\%$ . В центральном секторе он останется без изменений 3.00% (рис. 1).

Таким образом, реальная разница в величине ФП между центральным и восточным секторами – не десятки процентов, а в  $\sim 4.5$  раза. С западным – в 4.2 раза.

По-видимому, статистика восточных выбросов, создающих Форбуш-эффекты, определяется, в основном, распределением их долготного размера. Она говорит о том, что большинство выбросов по полуширине не превышают 45 градусов.

Ситуация с выбросами из западного сектора несколько другая. Из-за геометрии межпланетного магнитного поля мы иногда можем видеть вариации КЛ от далекого западного источника, даже когда создающий их выброс (ICME) проходит далеко от Земли. Таким образом, область ФП оказывается (в своей восточной части) шире, чем область выброса или область, занятая межпланетным возмущением. Однако нельзя забывать, что из-за той же геометрии ММП величина ФП в этой восточной части меньше, чем в западной. Видимо, поэтому в западном секторе больше Форбуш-понижений, чем в восточном, но их средняя величина намного ниже.

В каждую из групп попали разнообразные события, но мы, тем не менее, постарались выделить из них наиболее характерные. Примеры таких событий представлены на рисунках 2–6. Сплошная кривая на каждом рисунке соответствует профилю изотропной части вариации (плотности) КЛ с жесткостью 10 ГВ; векторная диаграмма представляет часовые значения вектора экваториальной составляющей анизотропии КЛ. Вертикальные вектора показывают изменение северо-южной компоненты анизотропии КЛ; тонкие линии соединяют одинаковые моменты времени на векторной диаграмме и кривой плотности КЛ через каждые 6 ч.

Характерными чертами ФЭ от далеких восточных источников являются их малая величина (в основном, 2–3%, полный разброс от 0.4 до 7%), протяженная фаза спада (до достижения минимума может пройти от суток до трех), соответственно, малая скорость понижения на фазе спада. Анизотропия КЛ в этих событиях (экваториальная составляющая первой гармоники), как правило, небольшая, но изменчивая по направлению, особенно на фазе спада, вплоть до полного вращения вектора (см. рис. 2).

На рисунке 3 представлен пример характерного ФЭ от более близкого восточного источника с гелиодолготой E37. Эти события отличаются от предыдущей группы большей величиной эффекта (в основном, 3–4%, хотя разброс величин от 0.3

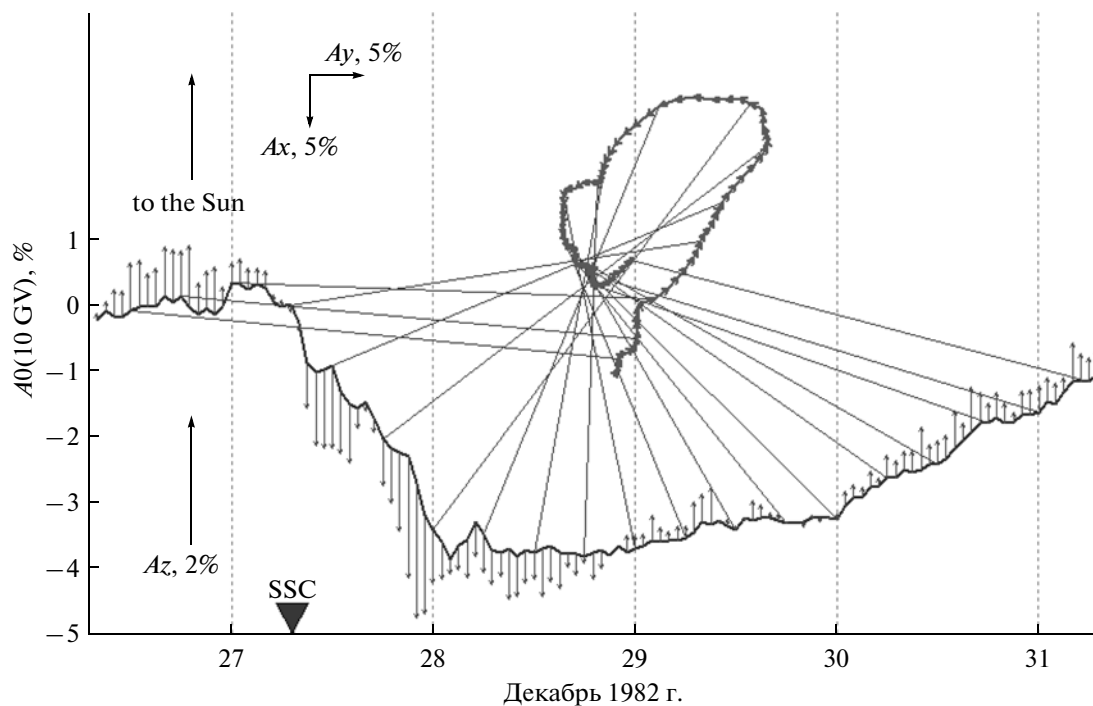


Рис. 3. Поведение плотности и векторной (суточной) анизотропии КЛ во время ФЭ, обусловленного восточным источником (E37).

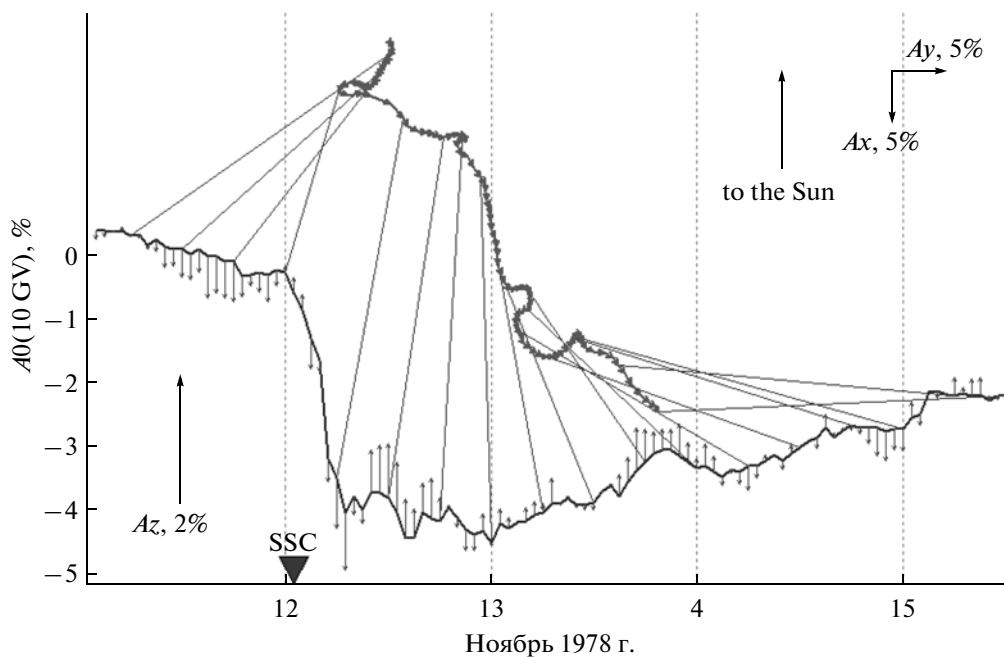


Рис. 4. Поведение плотности КЛ и вектора суточной анизотропии во время ФЭ, обусловленного источниками из области центральных гелиодолгот (E02).

до 20%). Минимум ФП достигается за более короткое время (порядка суток), но восстановление, по-прежнему, происходит медленно. Поведение анизотропии в этих случаях остается очень

сложным, вектор экваториальной составляющей вращается в течение всего ФЭ.

События, связанные с центральной группой источников (см. рис. 4), отличаются большой ампли-

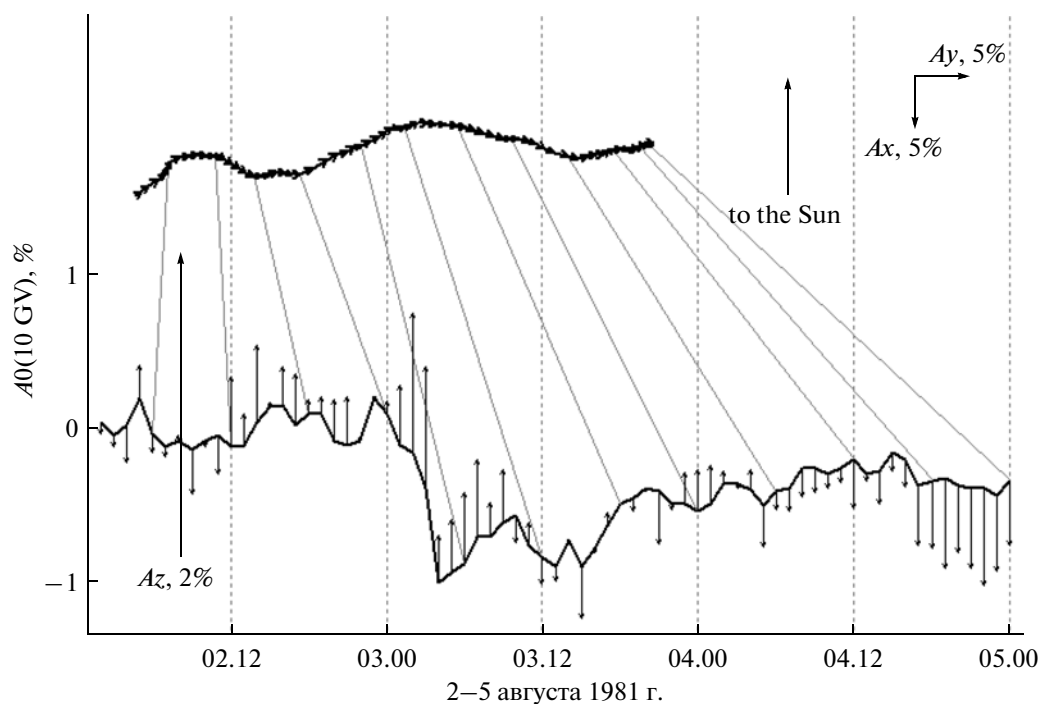


Рис. 5. Поведение плотности и векторной анизотропии КЛ во время ФЭ, обусловленного источником из западной группы (W20).

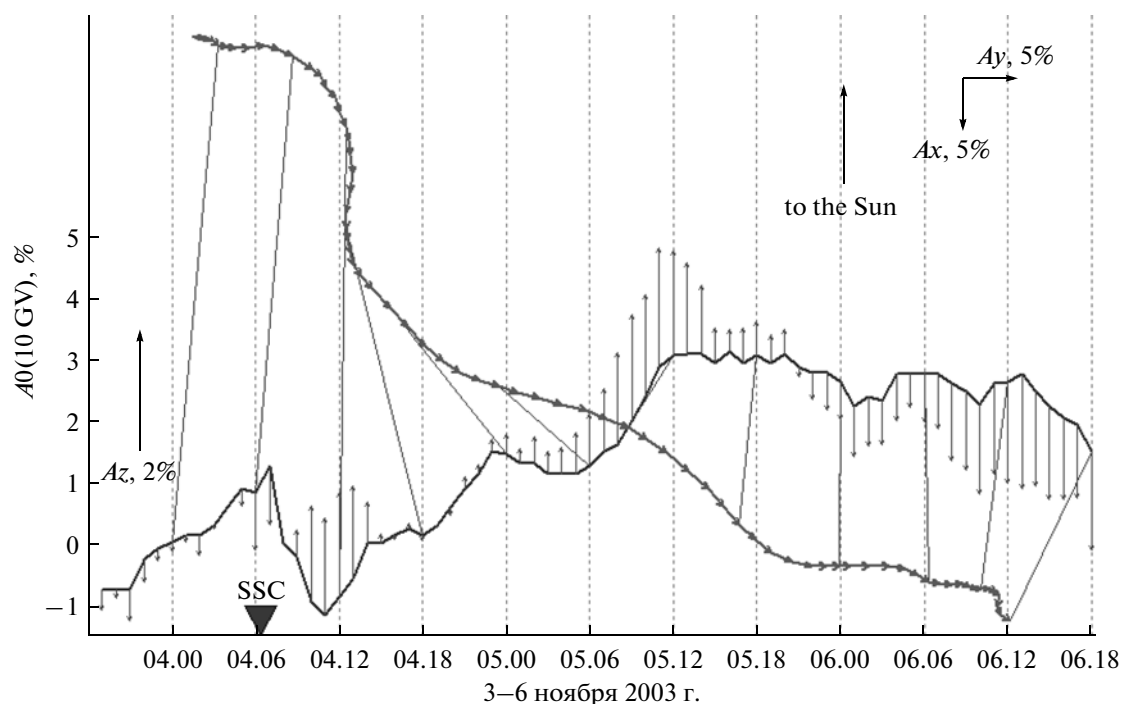


Рис. 6. Поведение плотности и векторной анизотропии КЛ во время ФЭ, обусловленного далеким западными источниками (W56).

тудой Форбуш-понижения (как правило, 3% и более, разброс от 0.3 до 20%), малым временем  $t_{\min}$  (минимум часто достигается за несколько часов), и

следовательно, большим декрементом  $D_{\min}$ . Поведение анизотропии становится более простым, а ее направление — более стабильным (с востока на за-

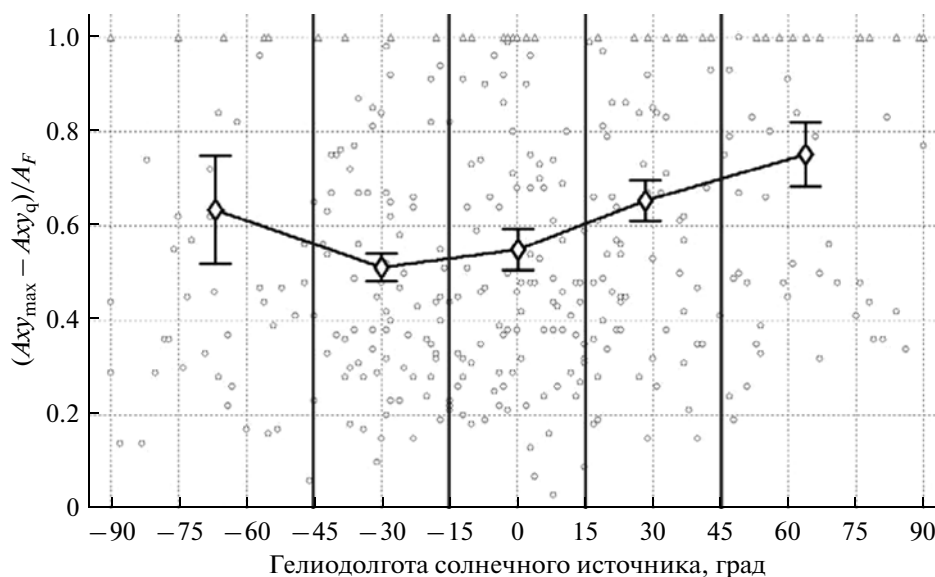


Рис. 7. Связь  $A_{xy}$  с амплитудой Форбуш-понижения  $A_F$  в зависимости от гелиодолготы источника.

пад), хотя во время главной фазы спада все еще заметны некоторые изменения в направлении. Кроме того, анизотропия резко возрастает по величине в главной фазе ФП.

Источники с относительно малых западных гелиодолгот (рис. 5), как правило, дают небольшие ФЭ с быстрым достижением минимума. Большая анизотропия с устойчивым направлением с востока на запад обеспечивается открытостью возмущенной области с восточной стороны.

От далеких источников на западе обычно наблюдаются маленькие (до 2%), быстрые и короткие ФП (рис. 6). Однако анизотропия в этих событиях часто бывает очень большая и устойчивая по направлению в течение долгого времени. Она сохраняет большую величину, даже когда ФП практически закончилось, и уровень КЛ восстановился. Это выглядит так, будто Земля, находясь в стороне от возмущенной области, чувствует ее длительное время через анизотропию КЛ.

Как видно из представленных на рисунках 2–6 результатов, поведение векторной анизотропии КЛ значительно отличается для разных долготных секторов источников. Самое сложное поведение, с вращением векторов экваториальной составляющей, наблюдается для восточных и центральных событий. Для ФЭ от западных источников анизотропия возрастает по величине и становится более устойчивой по направлению.

Для различных групп были получены параметры, характеризующие связь экваториальной составляющей анизотропии КЛ с амплитудой ФП ( $(A_{xy_{max}} - A_{xy_q})/A_F$ , где  $A_{xy_q}$  – средняя многолетняя величина  $A_{xy}$  в спокойные периоды), а также времена достижения минимума ФП ( $t_{min}$ ) и мак-

симальной скорости понижения интенсивности КЛ ( $t(D_{min})$ ). Изменения этих параметров с гелиодолготой солнечного источника приведены на рисунках 7, 8.

Также был получен параметр  $A_F/B_{max}$ , характеризующий связь амплитуды ФЭ с величиной ММП. Из анализа его поведения следует, что величина ФП ( $A_F$ ), приходящаяся на единицу напряженности ММП ( $B_{max}$ ), больше для восточных событий, чем для западных, что означает несколько большую эффективность восточных источников в создании ФЭ [Belov et al., 2009]. В событиях от восточных источников Земля попадает в западную периферийную часть возмущения солнечного ветра. Эта часть возмущения закрыта для обмена КЛ (в отличие от событий с западными источниками), и ФП здесь должно быть достаточно большим и продолжительным.

На рисунке 7 представлено поведение параметра  $(A_{xy_{max}} - A_{xy_q})/A_F$  в зависимости от гелиодолготы источника.  $A_{xy_q}$  (анизотропию в спокойные периоды) следует учитывать, поскольку анизотропия КЛ существует всегда (ее средняя величина для 10 ГВ ~0.5%), а межпланетные возмущения ее (как правило) увеличивают. Мы видим, что связь анизотропии КЛ с амплитудой ФП возрастает при удалении источника к западу от центра Солнца. Анизотропия становится очень большой, иногда по величине даже больше изменения плотности, в Форбуш-эффектах от далеких западных источников. Поскольку возмущенная область открыта с востока, восстановление идет быстро, и можно наблюдать поток частиц, направленный с востока на запад.

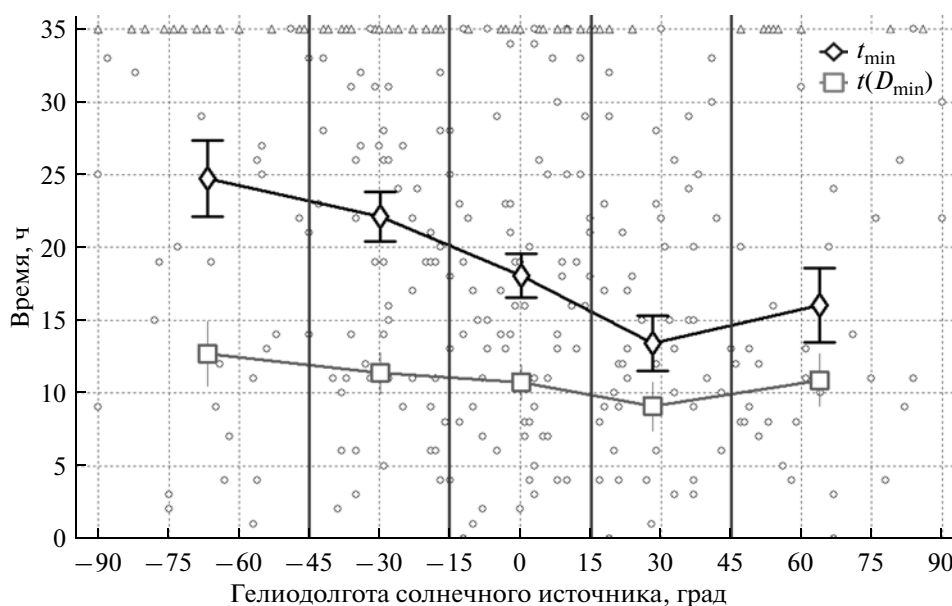


Рис. 8. Поведение времени достижения минимума ФП ( $t_{\min}$ ) и времени максимального декремента в фазе понижения ФЭ ( $t_{D_{\min}}$ ).

Рассмотренные зависимости могут служить источником дополнительной информации для прогнозов космической погоды. Например, если наблюдается малое значение  $A_F/B_{\max}$  и относительно большое  $A_{\text{ху}}_{\max}/A_F$ , есть основания говорить о западном источнике ФЭ. Таким образом, мы получаем дополнительные факторы, позволяющие судить о долготе источника, и часто — отделять западные события от восточных и центральных.

Характеристики, приведенные на рис. 8, показывают, как развивалось событие. Например, чем быстрее развивается эффект в западной области, тем он меньше и короче, понижение не успевает развиться полностью, так как Земля быстро выходит из возмущенной области. Восточные события развиваются медленнее, возмущенная область как бы набегает на Землю. Наиболее медленно развиваются события от дальних восточных источников, а быстрее всего — эффекты от умеренно западных.

Иногда, при очень далеком западном источнике, Земля может совсем не попасть в возмущенную область, и мы не заметим понижения плотности КЛ. Но значительные изменения анизотропии КЛ (в частности ее существенное увеличение) будут происходить долгое время, Земля получает возможность “наблюдать” этот источник издалека в космических лучах.

#### 4. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Сравнение Форбуш-эффектов, обусловленных спорадическими солнечными источниками

(СМЕ) из различных областей солнечного диска, выявляет существенную зависимость различных параметров ФЭ от гелиодолготы источника.

Направление анизотропии КЛ во время ФЭ более изменчиво для восточных и центральных источников и более устойчиво для западных.

Эффекты, ассоциированные с восточными СМЕ, развиваются наиболее медленно.

Чем ближе источник к западному краю солнечного диска, тем более анизотропен ФЭ (тем больше сама анизотропия и отношение наблюдаемой анизотропии к вариациям плотности КЛ в этом ФЭ).

Группа ФЭ с умеренно западными источниками выделяется своим быстрым развитием (в частности, быстрым достижением минимума ФП).

Дальнейший анализ может выявить также и другие параметры Форбуш-эффектов, существенно зависящие от гелиодолготы источника. Знание таких зависимостей дает дополнительную информацию о причинах возмущений солнечного ветра, позволяет судить об их дальнейшем развитии и имеет прогностическую ценность.

Авторы благодарны коллективам станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: (<http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>).

Работа частично поддержана РФФИ грантом № 11-02-01478, Программой № 6 Президиума РАН “Нейтронная физика и астрофизика”, Госконтрактом Министерства науки № 14.740.11.0609.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Barnden L.R.* Forbush Decreases 1966–1972; their solar and interplanetary associations and their anisotropies // Proc. 13-th ICRC. 17-30 Aug. 1973, Denver, USA. V. 2. P. 1271–1276. 1973.
- *Belov A.V.* Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Proc. 257-th of the International Astronomical Union. Ed. N. Gopalswamy, and D. F. Webb. Ioannina, Greece. V. 257. P. 439–450. 2009.
- *Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Yanke V., Pchelkin V., Plainaki C., Mariatos G.* Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. 110, A09S20, doi: 10.1029/2005JA011067, 2005a.
- *Belov A., Eroshenko E., Oleneva V., Struminsky A., Yanke V.* What determines the magnitude of Forbush decrease? // Adv. Space Res. V. 27. № 3. P. 625–630. 2001.
- *Belov A., Garcia H., Kurt V., Mavromichalaki H., Geronidou M.* Proton enhancements and their relation to x-ray flares during the three last solar cycles // Solar Phys. V. 229. № 1. P. 135–159. 2005b.
- *Burlaga L., Berdichevsky D., Gopalswamy N., Lepping R., Zurbuchen T.* Merged interaction regions at 1 AU // J. Geophys. Res. V. 108. NA12, SSH 2-1. CiteID 1425. doi: 10.1029/2003JA010088, 2003.
- *Cane H.V.* Coronal mass ejections and forbush decreases // Space Sci. Rev. V. 93. № 1–2. P. 55–77. 2000.
- *Cane H., Richardson J., von Rosenvinge T.T., Wibberenz G.* Cosmic ray decreases and shock structure: a multispacecraft study // J. Geophys. Res. V. 99. P. 21429–21441. 1994.
- *Cane H.V., Richardson I.G., von Rosenvinge T.T.* Cosmic ray decreases: 1964–1994 // J. Geophys. Res. V. 101. P. 21561–21572. 1996.
- *Cliver E.W., Cane H.* The angular extents of solar/ interplanetary disturbances and modulation of galactic cosmic rays // J. Geophys. Res. V. 101. P. 15533–15546. 1996.
- *Crooker N.U., Cliver E.W.* Postmodern view of *M*-regions // J. Geophys. Res. V. 99. P. 23383–23388. 1994.
- *Gonzalez W.D., Tsuritani B.T., McIntosh P.S., Clua de Gonzalez A.L.* Coronal hole-active region-current sheet (CHARCS) association with intense interplanetary and geomagnetic activity // Geophys. Res. Lett. V. 23. № 19. P. 2577–2581. 1996.
- *Gopalswamy N., Yashiro S., Krucker S., Stenborg G., Howard R.A.* Intensity variation of large solar energetic particle events associated with coronal mass ejections // J. Geophys. Res. V. 109. N A12105. 2004.
- *Haurwitz M.W., Yoshida S., Akasofu S.I.* Interplanetary magnetic field asymmetries and their effects on polar cap absorption events and Forbush decreases // J. Geophys. Res. V. 70. P. 2977–2988. 1965.
- *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G.* Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space // Nuovo Cimento. V. 2C. № 4. P. 1–52. 1979.
- *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G., Pinter S.* Longitudinal dependence of the interplanetary perturbation produced by energetic type 4 solar flares and of the associated cosmic ray modulation // Proc. 19-th ICRC. 11–23 Aug. 1985, San Diego, USA. V. 5. P. 234–237. 1985.
- *Iucci N., Pinter S., Parisi M., Storini M., Villoresi G.* The longitudinal Asymmetry of the interplanetary perturbation producing Forbush decreases // Nuovo Cimento. V. 9C. P. 39–50. 1986.
- *Richardson I.G., Cane H.V.* Signatures of shock drivers in the solar wind and their dependence on the solar source location // J. Geophys. Res. V. 98. P. 15295–15304. 1993.
- *Sinno K.* Mechanism of cosmic ray storms inferred from some statistical results // Rep. Ionosph. Ionosphere Space Res. Japan V. 15. № 2. P. 276–279. 1961.