

## ПЕРВАЯ ГАРМОНИКА АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ

М.А. Абунина, А.А. Абунин, А.В. Белов, Е.А. Ерошенко, В.А. Оленева, В.Г. Янке

## THE FIRST HARMONIC OF COSMIC RAY ANISOTROPY DURING THE INITIAL PHASE OF FORBUSH EFFECTS

M.A. Abunina, A.A. Abunin, A.V. Belov, E.A. Eroshenko, V.A. Oleneva, V.G. Yanke

Изучается фазовое распределение и амплитудно-фазовая зависимость первой гармоники анизотропии космических лучей в начальной фазе форбуш-эффекта. Статистический анализ всех форбуш-эффектов с внезапным началом за 1957–2012 гг. показал, что главные особенности фазовых распределений первой гармоники анизотропии космических лучей сохраняются во всей главной фазе форбуш-эффектов, начиная с часа до ударной волны, вплоть до часов с максимальной амплитудой анизотропии. Амплитуда векторной анизотропии уже перед приходом ударной волны выше, чем в спокойные периоды, и постепенно возрастает при углублении в межпланетное возмущение, создающее форбуш-понижение.

Phase distribution and amplitude-phase dependence of the first harmonic of the cosmic ray anisotropy during the initial phase of Forbush effects are studied. Statistical analysis of all Forbush effects with sudden onset during 1957–2012 showed that the main features of phase distribution of the first harmonic of the cosmic ray anisotropy persist throughout the main phase of the Forbush effects, starting from the hour before the shock wave until the hour with the maximal amplitude of anisotropy. Amplitude of vector anisotropy is higher already before the arrival of the shock wave than in quiet periods, and it gradually increases as Earth enters deeper the interplanetary disturbance which creates the Forbush decrease.

### Введение

Многочисленные экспериментальные данные, и конвективно-диффузионная модель [Крымский, 1964, 1981] говорят о преимущественных направлениях векторной анизотропии космических лучей (КЛ). В межпланетной среде есть выделенные направления, определяемые скоростью солнечного ветра и положением силовых линий межпланетного магнитного поля. К тому же у Земли почти постоянно наблюдается положительный по знаку и умеренный по величине радиальный градиент плотности КЛ. Следствием этих обстоятельств является неоднородное распределение векторной анизотропии по фазе [Belov, 1987; Belov et al., 1987]. В данной работе проводится исследование фазового распределение первой гармоники анизотропии в возмущенные периоды, а именно, в начале форбуш-эффекта (ФЭ) – за час до прихода ударной волны и в первые несколько часов после ее прихода. Для этого используется большой статистический материал (за 1957–2013 гг.), накопленный в ИЗМИРАН.

### 1. Данные и методы

В данной работе мы использовали базы данных, созданные в ИЗМИРАН. Первая – база данных межпланетных возмущений и форбуш-эффектов, в которой содержатся вариации плотности и анизотропии космических лучей, а также солнечные, межпланетные и геомагнитные характеристики [Belov et al., 1999]. Эта база данных включает в себя большое количество различных характеристик по ~6000 ФЭ более чем за полувековой период наблюдений (1957–2013 гг.). Вторая – база данных по вариациям космических лучей, которая включает различные показатели межпланетной среды (параметры солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и др.), космических лучей (плотность, анизотропия и др.), а также индексы геомагнитной активности и солнечные параметры. Космические лучи представлены результатами глобальной съемки по данным всей мировой сети нейтронных мониторов (GSM) [Belov et al., 2005] для жесткости 10 ГВ, а информация по солнечному ветру взята из базы данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Мы

используем среднечасовые характеристики из базы данных для КЛ с жесткостью 10 ГВ.

Для работы отбирались те форбуш-эффекты, которые начинались с прихода ударной волны (SSC), были отделены от следующего события минимум на 36 часов, а от начала предыдущего – на 60 ч и более, когда предыдущее событие было более 1.4 %. Мы также не использовали часы, во время которых наблюдалось наземное возрастание (GLE). Всего получилось 817 событий.

### 2. Обсуждение результатов

В данной работе мы, в основном, рассматриваем Форбуш-эффекты, вызванные спорадическими возмущениями межпланетной среды, которые достаточно часто сопровождаются приходом межпланетных ударных волн. Эти эффекты обычно достаточно быстро достигают своего минимума, после чего восстановление плотности КЛ происходит несколько дней. Подобные ФЭ подробно рассматривались, например, в статье [Абунина и др., 2012]. На рис. 1. представлено типичное поведение КЛ в ФЭ с ударной волной. На рис. 1 показаны некоторые из характеристик ФЭ:  $A_F$  – величина ФЭ (максимальная вариация плотности КЛ для 10 ГВ);  $d_{\min}$  – максимальное уменьшение плотности КЛ за 1 ч в данном событии, т. е. максимальный декремент;  $t_{\min}$  – полное время основной фазы ФЭ, т. е. время, прошедшее между началом события (совпавшего с SSC в данном случае) и моментом максимального понижения плотности КЛ. Здесь же даны обозначения для исследуемых периодов. Мы считаем час прихода ударной волны (час SSC) нулевым часом и обозначаем предыдущий час буквой «b», а следующий час – цифрой «1». Кроме этого рассмотрены: момент максимального падения плотности КЛ (обозначение « $dm$ »), и момент « $max$ » (на рисунке не показанный) максимальной амплитуды экваториальной составляющей анизотропии КЛ (обозначение « $A_{x_{\max}}$ » и, соответственно, « $N_{\max}$ »).

В начале рассмотрим распределения амплитуды  $A_{xyb}$  и фазы  $N_b$  перед приходом ударной волны, и срав-

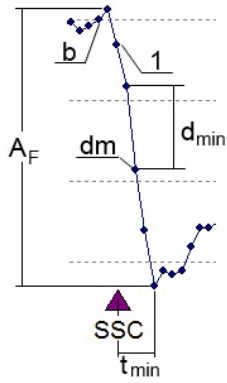


Рис. 1. Поведение плотности КЛ в начале форбуш-эффекта.

Средние значения параметров межпланетной среды перед форбуш-эффектом и в спокойные периоды

	b	q	q2
$A_p$ mean, 2нТл	9.3	5.6	
$V$ mean, км/с	410	370	
$B$ mean, нТл	8.9	5.3	
$A_{xy}$ , %	0.77	0.56	0.63

Обозначения:  $A_p$  – Ар-индекс геомагнитной активности,  $V$  – скорость солнечного ветра,  $B$  – напряженность межпланетного магнитного поля,  $A_{xy}$  – амплитуда анизотропии космических лучей.

ним выбранных событий с соответствующими распределениями в спокойные периоды ( $A_{xyq}$  и  $N_q$ ). Спокойные периоды мы отбирали по следующим критериям: напряженность межпланетного магнитного поля  $B < 10$  нТл, индекс геомагнитной активности  $A_p < 20$  и скорость солнечного ветра  $V < 450$  км/ч. Были также исключены часы с наземным возрастанием, всего получилось 158 140 условно спокойных часов.

Из рис. 2, а видно, что в часы, предшествующие часу прихода ударной волны, амплитуда анизотропии значительно увеличивается по сравнению с обычными спокойными периодами, и это увеличение происходит на всех долготях. Это увеличение может быть связано с тем, что межпланетная среда перед началом ФЭ более возмущена, чем в спокойные периоды. Чтобы проверить это предположение, мы рассчитали средние значения параметров межпланетной среды перед (b) ФЭ (см. таблицу) и сравнили их со значениями для спокойных (q) периодов. Можно видеть, что условия перед форбуш-эффектами более возмущенные, чем в обычные спокойные периоды.

Можно видеть, что условия перед ФЭ более возмущенные, чем в обычные спокойные периоды. Однако, поскольку зависимость величины анизотропии от обсуждаемых параметров слаба, выявленных различий в межпланетных условиях явно недостаточно, чтобы объяснить разницу в амплитудах  $A_{xy}$ . Чтобы получить подтверждение этому, мы выделили из спокойных часов только те, которые удовлетворяли бы средним значениям параметров перед ФЭ, оставив только часы с  $V_{q2}$  от 400 до 420 км/ч,  $B_{q2}$  от 7 до 9 нТл и с  $A_{pq2}$  от 8 до 10. Для этой новой выборки мы рассчитали среднее значение амплитуды анизотропии КЛ и получили значение  $A_{xyq2} = 0.63$  %, которое ближе к средней величине для всех спокойных периодов, а не к  $A_{xyb}$ . Таким образом, только некоторая часть разницы

( $A_{xyb} - A_{xyq}$ ) может быть объяснена различием межпланетных условий. Большая же часть увеличения анизотропии связана, скорее всего, с предвестником прихода межпланетного возмущения, а не с различиями в межпланетных условиях.

Также на рис. 2, а следует отметить некоторое смещение больших амплитуд в сторону больших фаз. Это говорит о появлении перед приходом межпланетных возмущений значительных потоков КЛ, направленных к Солнцу внутрь возмущенной области, где происходит форбуш-понижение. Тем не менее, фазовые распределения для спокойных часов и часов, предшествующих часу прихода ударной волны, очень похожи, что можно видеть на рис. 2, б.

Отметим, что кривые для часов, предшествующих часу прихода ударной волны, менее гладкие, чем для спокойных часов, из-за различной статистической обеспеченности этих выборок (для спокойных периодов – 158 140 ч, для исследуемых событий – 817 ч). По этой же причине, для b-выборки не стоит придавать большого значения изменениям значений амплитуд с фазами в диапазоне от  $200^\circ$  до  $300^\circ$ , так как из-за малого количества событий с такими фазами велика статическая погрешность этих величин.

Далее мы исследовали изменения фазовых и амплитудно-фазовых распределений ( $N$  и  $A_{xy}$ ) по мере прохождения возмущения мимо Земли. Отдельно мы рассматривали последний час перед приходом ударной волны ( $A_{xyb}$  и  $N_b$ ), один час после прихода ударной волны ( $A_{xy1}$  и  $N_1$ ), час максимального понижения плотности КЛ в ФЭ ( $A_{xydm}$  и  $N_{dm}$ ) и час максимального значения анизотропии КЛ ( $A_{xy\max}$  и  $N_{\max}$ ) в данном событии. Напомним, что час прихода ударной волны считается нулевым часом.

Максимальная амплитуда анизотропии  $A_{xy\max}$  по определению должна иметь самое большое значение, но следует заметить (рис. 3, а), что она не просто выше, а существенно выше всех остальных (в 2–3 раза). Это справедливо даже по сравнению со значением  $A_{xydm}$  (которое наблюдается уже глубоко в межпланетном возмущении). Важно отметить, что кривая для значений  $A_{xy\max}$  имеет большие значения при всех направлениях. Событий с максимальной амплитудой в аномальных направлениях мало, но анизотропия велика и в этих случаях.

Для фаз до  $130^\circ$  значения амплитуд распределены по увеличению по мере прохождения Земли в межпланетном возмущении ( $A_{xyb} < A_{xy1} < A_{xydm} < A_{xy\max}$ ). Интересно, что максимум  $A_{xy}$  значительно (в среднем на 3.4 ч) запаздывает по отношению к моменту  $dm$  наиболее быстрого спада плотности КЛ, который должен быть близок к моменту максимальной радиальной составляющей градиента КЛ.

Мы выделили область между  $45^\circ$  и  $135^\circ$ , в которой находится большинство точек для всех распределений по фазе анизотропии (рис. 3, б) и получили, что в этой зоне находятся 69.3 % точек для  $N_{\max}$ , 61.4 % точек для  $N_b$ , 63.2 % точек для  $N_{dm}$ , 66 % точек для  $N_1$  от общего количества. Подобные вычисления были приведены в работе [Абунина и др., 2013] для фазового распределения в период с 1957 по 2010 гг. В этой работе выделялась область между  $40^\circ$  и  $130^\circ$ , в которой находится большинство точек (60.4 % всех часов).

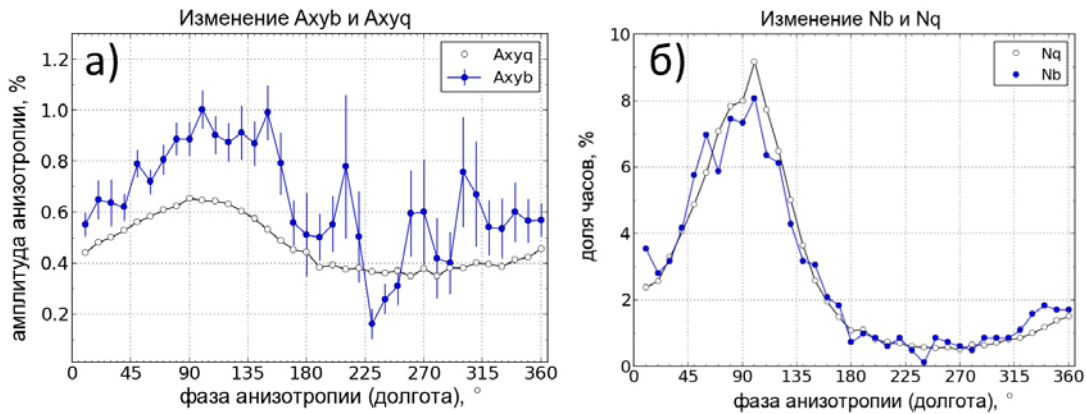


Рис. 2. Сравнение изменения амплитуды анизотропии (а) и фазового распределения (б) спокойных периодов и за один час до прихода ударной волны в исследуемых событиях.

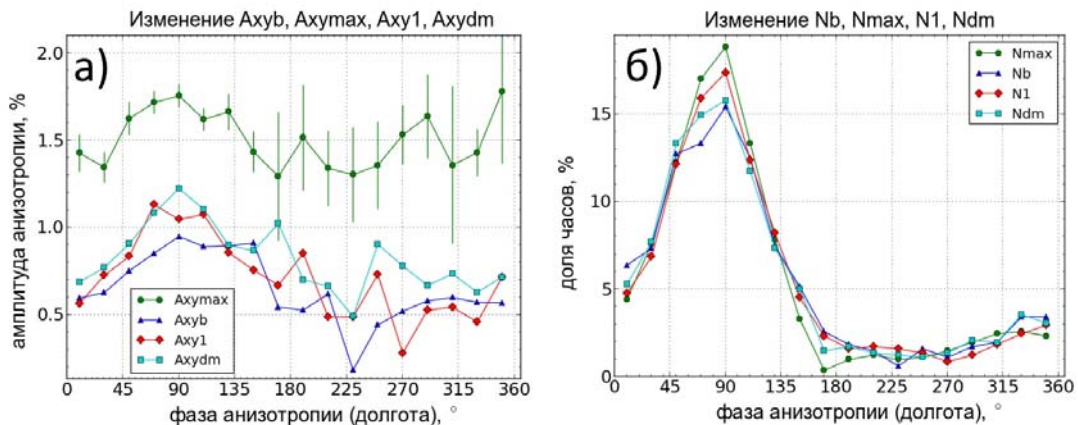


Рис. 3. Изменение поведения амплитуды анизотропии (а) и фазового распределения (б) в исследуемых событиях за один час до прихода ударной волны ( $A_{xyb}$  и  $N_b$ ), в следующие час после прихода ударной волны ( $A_{xy1}$  и  $N_1$ ), в час максимального изменения плотности КЛ ( $A_{xydm}$  и  $N_{dm}$ ) и в час с максимальным значением анизотропии ( $A_{xymax}$  и  $N_{max}$ ).

В целом, главные особенности распределения сохраняются и при входе в возмущение, и в последующие часы, и даже в часы с максимальной амплитудой анизотропии, т. е. выделенные направления прихода анизотропии существуют практически постоянно, даже в возмущениях.

### 3. Основные выводы

В часы, предшествующие часу прихода ударной волны, амплитуда анизотропии значительно увеличивается по сравнению с обычными спокойными периодами, и это увеличение происходит на всех долготах. Максимальная амплитуда анизотропии  $A_{xymax}$  существенно выше значений анизотропии в час до прихода ударной волны, в час после прихода ударной волны и в час максимального падения плотности КЛ.

Для фаз до  $130^\circ$  значения амплитуд распределились по увеличению по мере прохождения Земли в межпланетном возмущении ( $A_{xyb} < A_{xy1} < A_{xydm} < A_{xymax}$ ).

В целом, главные особенности распределения сохраняются и при входе в возмущение, и в последующие часы, и даже в часы с максимальной амплитудой анизотропии, т. е. выделенные направления прихода анизотропии существуют практически постоянно, даже в возмущениях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В. и др. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52. № 3. С. 1–8.
- Абунина М.А., Абунин А. А., Белов А.В. и др. Долгопериодные изменения амплитудно-фазовой взаимозависимости первой гармоники анизотропии космических лучей // Геомагнетизм и аэронавигация. 2013. Т. 53, № 5. С. 601–610.
- Крымский Г.Ф. Диффузионный механизм суточной вариации космических лучей // Геомагнетизм и аэронавигация. 1964. Т. 4, № 6. С. 977–986.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. Самсонов И. Космические лучи и солнечный ветер // Новосибирск: Наука, 1981. С. 224.
- Belov A.V. The first harmonic of CR anisotropy in the convection-diffusion model / Proc. 20<sup>th</sup> ICRC. Moscow, USSR, 1987. V. 4. P. 119–122.
- Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Oleneva V.A. Cosmic ray gradient variations in 1974 / Proc. 20<sup>th</sup> ICRC. Moscow, USSR, 2–15 Aug 1987. 1987. V. 4. P. 137–139.
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Global and local indices of cosmic ray activity // Proc. 26<sup>th</sup> ICRC. Salt Lake City. 1999. V. 6. P. 472–475.
- Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., et al. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, doi: 10.1029/2005JA011067.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, Россия, Москва, Троицк, Россия