

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 537.591.5

АНАЛИЗ СОБЫТИЯ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ В ИЮНЕ 1991 г.
ПО ДАННЫМ ИСЗ «ГРАНАТ»

Г. П. Любимов, Е. Е. Григоренко

(НИИЯФ)

Проведен анализ сложного хода возрастания интенсивности солнечных космических лучей с энергиями 1–20 и более 20 МэВ. Событие было вызвано серией из 6 мощных солнечных вспышек, произошедших в одной и той же активной области на гелиодолготах от E65 до W69. Это обстоятельство определило существенную роль гелиодолготного эффекта в распространении солнечных космических лучей и вспышечных возмущений. Применение «отражательной» модели позволило выявить связи солнечных вспышек с модуляцией потоков солнечных космических лучей и галактических космических лучей.

Экспериментальные данные

Эксперимент НИИЯФ МГУ на ИСЗ «ГРАНАТ» описан в работах [1–5]. В работе [6] дан предварительный анализ рассматриваемого события. В [7, 8] оно рассмотрено по данным других экспериментов и моделей [9]. На рис. 1 показаны: интенсивность I потоков протонов солнечных космических лучей (СКЛ) с солнечного направления (данные ИСЗ «ГРАНАТ», полученные вне радиационных поясов Земли), временной ход коэффициента анизотропии A для протонов с энергиями 1–20 МэВ и абсолютной величины показателя степенного интегрального энергетического спектра γ , а также скорость счета нейтронного монитора «Апатиты» V . Вертикальными черточками на оси абсцисс отмечены моменты максимума солнечных вспышек (F) с номерами, соответствующими номерам в таблице, где приведены данные о солнечных вспышках, отобранные нами из работы [10]. Везде в статье подразумевается мировое время.

Анализ данных

Полная длительность всего события составляет 27–28 сут (с 30 мая по 26 июня 1991 г.), но здесь не рассматриваются подробно начальный и конечный интервалы события. Начальное возрастание интенсивности СКЛ по отношению к уровню фона связано с серией солнечных вспышек (28, 29 и 30 мая, баллы 1В–3В) в активной области 6654 и с выходом этой области 27 мая из-за восточного лимба Солнца, вызвавшим значительное возмущение межпланетной среды, которое в свою очередь затруднило прямой приход частиц СКЛ от этих вспышек и обусловило практически нулевую анизотропию в распространении протонов СКЛ с энергиями 1–20 МэВ.

Первое возрастание интенсивности СКЛ (4 июня) представляет собой треугольный симметричный пик с очень мягким энергетическим спектром. Начало этого возрастания для протонов с энергиями

1–20 МэВ совпадает с моментом вспышки № 3. Однако прямой поток СКЛ значительно ослаблен и сильно модулирован возмущением межпланетной среды. Параметры солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) по данным спутников «ИМР-8» и «ИМР-Ж» [10] весьма детально описывают это возмущение. Ударная волна, вызвавшая внезапное начало магнитной бури (SC) 4 июня в 15 ч 35 мин, наблюдается одновременно с максимумом СКЛ [10]. Максимум индекса геомагнитной активности $Kp = 9$ наблюдался 5 июня в 18 ч, конец возмущения — 6 июня [10].

Это возмущение в СВ и ММП экранирует детектор от прямого потока СКЛ, созданного вспышкой № 3. На момент, предшествующий пику 4 июня, наблюдается небольшая положительная анизотропия (рис. 1), соответствующая «подножию» пика, а к моменту наблюдения самого пика анизотропия вновь обращается в нуль. Это указывает на то, что основная доля частиц, приходящих к детектору, захвачена в ловушку, созданную вспышечными выбросами, в которой уже успело установиться изотропное распределение частиц.

Для объяснения модуляционных эффектов в СКЛ необходимо кроме вспышки № 3 привлечь еще и вспышки № 1 и 2. Возмущение от вспышки № 1, произошедшей на восточном лимбе Солнца, создало «зеркало» в окрестности детектора, а возмущение от вспышки № 2 — другое «зеркало» перед детектором на момент вспышки № 3. Вспышка № 3 создала еще одно «зеркало» на момент прихода второго «зеркала» к детектору (рис. 2).

Можно предположить другой вариант, считая источником первого зеркала вспышку № 2, а источником СКЛ и SC в 15 ч 35 мин 4 июня — вспышку № 3. Тогда для вспышки № 2 и SC в 3 ч 37 мин 4 июня скорость фронта возмущения составит 1122 км/с.

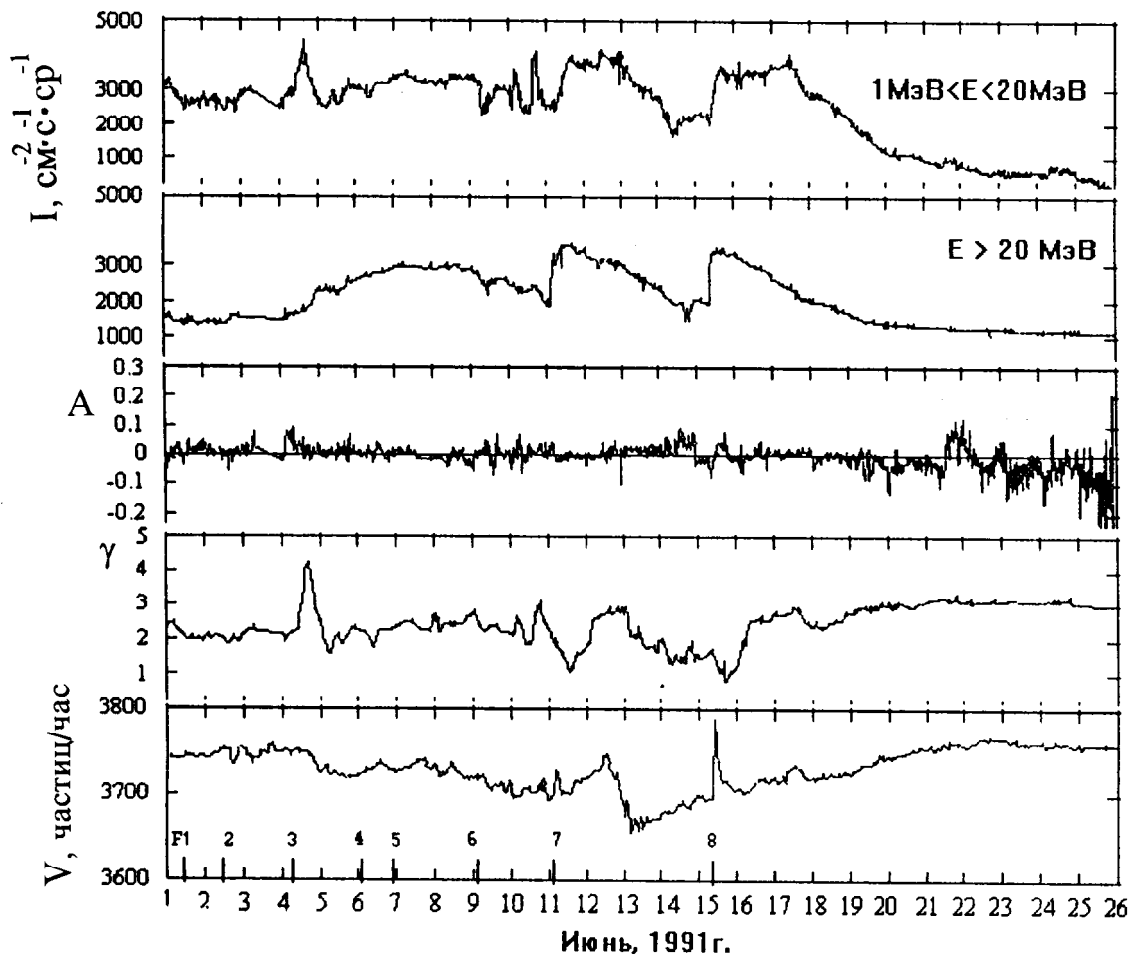


Рис. 1. Интенсивность I потоков солнечных протонов в разных энергетических интервалах; коэффициент анизотропии A для протонов с энергиями $1 \text{ МэВ} < E < 20 \text{ МэВ}$; абсолютная величина показателя степенного интегрального энергетического спектра протонов γ с энергиями $E > 1 \text{ МэВ}$ и $E > 20 \text{ МэВ}$; среднечасовая скорость счета V нейтронного монитора «Апатиты» в период с 1 по 26 июня 1991 г.

Основные параметры солнечных вспышек, связанных с развитием события в СКЛ (по [10])

№	Дата, июнь 1991 г.	Время максимума (UT)	Балл	Положение на Солнце	№ АО	Тип радиоизлучения
1	1	15.03	1F/X12	N25E90	6659	2/4
2	2	14.12	2B/M2.8	S08W19	6652	2/4
3	4	03.57	3B/X12	N34E65	6659	2/4
4	6	01.08	4B/X12	N32E44	6659	2/4
5	7	00.38	3B/M4.2	N29E24	6659	4
6	9	01.43	3B/X10	N30E06	6659	2/4
7	11	01.56	3B/X12	N32W19	6659	2/4
8	15	08.21	3B/X12	N33W69	6659	2/4

Для вспышки № 3 скорость будет 3461 км/с. В этом случае третьим зеркалом, вызвавшим SC в 21 ч 18 мин 5 июня и в 1 ч 2 мин 6 июня, могут быть квазистационарные неоднородности в СВ и ММП, границы секторов ММП (SB) [15, 16]. На картах маг-

нитного поля Солнца можно видеть SB на кэррингтоновской долготе 330° .

Заметим, что аналогичная ситуация будет повторяться и далее для последующих вспышек (особенно для вспышки № 6). Приход к детектору возмущения от вспышки № 3 совпал по времени со вспышкой № 4 и так же, как и в предыдущем случае, затруднил прямой приход СКЛ от вспышки № 4 к детектору. В свою очередь возмущение от вспышки № 4 также будет задерживать приход СКЛ от вспышки № 5. Эти рассуждения относятся и к вспышке № 5. Возмущение, связанное со вспышкой № 5 и со вспышкой 7 июня в 6 ч 16 мин (1B/M1.3; N08W09; АО 6660; II тип радиоизлучения) задерживает приход СКЛ от вспышки № 6. Два пика СКЛ 10 июня с мягким спектром аналогичны ситуации 4 июня, но здесь не наблюдается отличной от нуля анизотропии.

Вспышка № 7 (это серия из 4–5 вспышек) является уже западной и происходит после ухода за детектор сильного возмущения 10 июня от вспышки № 6. Поэтому интенсивность СКЛ от этой вспышки

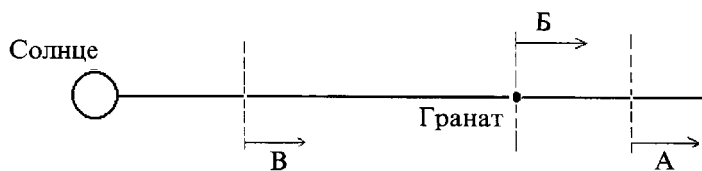


Рис. 2. Схема расположения передних фронтов возмущений от вспышек: *A* — фронт от вспышки *F1*, скорость фронта $V = 685$ км/с (или от *F2*, $V = 1122$ км/с); *B* — от *F2*, $V = 841$ км/с (или от *F3*, $V = 3461$ км/с); *B* — от *F3*, $V = 998$ км/с (или квазистационарные неоднородности СВ и ММП от предыдущих вспышек)

быстро нарастает, и скорость роста пропорциональна энергии частиц. В это время во временном ходе показателя спектра наблюдается провал: спектр становится значительно жестче, что соответствует максимуму интенсивности СКЛ высоких энергий. Спад интенсивности задержан для протонов с энергиями более 20 МэВ, а для протонов с энергиями 1–20 МэВ наблюдается «плато», которому соответствует вначале быстрое увеличение показателя спектра, а затем замедление его роста. Такой характер затянутого во времени максимума обусловлен приближением межпланетной петлевой ловушки, населенной частицами СКЛ, к линии соединения детектора с Солнцем (в связи с вращением Солнца), а также радиальным движением ловушки вспышечного выброса к детектору [11–16]. В ходе возрастания интенсивности анизотропия равна нулю, что также указывает на прохождение через детектор ловушки, населенной частицами СКЛ низких энергий, которые удерживаются в ней намного эффективнее, чем частицы более высоких энергий. Это и объясняет отсутствие эффекта возрастания в ходе интенсивности частиц с энергиями более 20 МэВ. Значительная модуляция максимального уровня интенсивности СКЛ низких энергий указывает на дискретную структуру спиральных петлевых ловушек [2, 15]. Вспышка №7 образовала сильное неоднородное возмущение (два *SC* 12 и 13 июня) и вызвала значительный форбуш-эффект на нейтронных мониторах, который и обусловил абсолютный минимум интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) 13 июня.

Следует заметить, что, несмотря на мощные вспышки, до 12 июня не наблюдалось больших форбуш-эффектов на нейтронных мониторах, хотя средний уровень ГКЛ неуклонно падал. Падение уровня ГКЛ скорее всего связано с высокой частотой вспышек и вспышечных возмущений (см. *Kp*-индекс в [10]) и с гелиодолготными эффектами [16], но можно предположить и перенос СКЛ высоких энергий во вспышечных возмущениях [16].

Последняя вспышка №8 произошла на западе диска Солнца, за точкой соединения детектора с Солнцем, поэтому крутизна переднего фронта интенсивности СКЛ здесь еще выше [11, 16]. Ход интенсивности СКЛ и характер спектра аналогичны тем, которые наблюдались в событии 11 июня. Отмечает-

ся резкое уменьшение показателя спектра γ , соответствующее максимальному возрастанию интенсивности *I* для протонов с энергиями более 20 МэВ. Затем быстрое возрастание γ переходит в более медленное, соответствующее максимуму интенсивности для протонов СКЛ с энергиями 1–20 МэВ. Этот максимум еще шире, чем в предыдущем событии, и также сильно модулирован, что связано со сложной структурой солнечных магнитных полей восточнее АО 6659 [10]. Параметры СВ и ММП, по данным [10], варьируют слабее, а уровень интенсивности ГКЛ растет в связи с удалением вспышечного источника к западу. Наблюдается небольшая положительная анизотропия (меньше 10%), которая, как и в случае пика 4 июня, соответствует подножию основного возрастания *I*, а также незначительная положительная анизотропия, соответствующая первому локальному максимуму возрастания интенсивности *I* для протонов с энергиями 1–20 МэВ. Далее анизотропия обращается в нуль, что, как и ранее, указывает на возможный приход к детектору межпланетной ловушки, населенной частицами.

На конечном участке события (1–26 июня) интенсивность протонов с энергиями 1–20 МэВ вначале быстро падает, что соответствует кратковременному спаду в ходе показателя спектра, а затем спад интенсивности замедляется. Для протонов более высоких энергий подобных переломов не отмечается и интенсивность гораздо скорее спадает до фонового значения, спектр становится мягче. Анизотропия в конце рассматриваемого события принимает отрицательные значения, возможно, из-за пересечения детектором одной из ветвей межпланетной петли, в которой частицы движутся к Солнцу. Подобная ситуация наблюдалась в марте 1991 г. [16]. В рассматриваемом событии наблюдается заметная дисперсия в анизотропии, связанная с пересечением микротрубочек ММП, движущихся вместе с плазмой солнечного ветра. В этих трубочках частицы могут двигаться от Солнца или к Солнцу, что и обеспечивает дисперсию анизотропии. Этот эффект, вероятно, присутствует постоянно, но при больших потоках частиц СКЛ незаметен и становится хорошо видимым лишь при приближении интенсивности частиц к фоновым значениям.

Заключение

Протяженное по времени событие (с 1 по 26 июня 1991 г.) с большой интенсивностью СКЛ (см. рис. 1) было обусловлено высокой вспышечной активностью двух активных центров. Первый центр находился на кэррингтоновской долготе 0 и широтах N07 (АО 6654, вспышки 28, 29 и 30 мая были причиной начала возрастания) и S08 (АО 6652, вспышка №2 в таблице). Второй центр был на долготе 250 и широте N(25–34), АО 6659, вспышки №1, 3–8 в таблице. Несмотря на высокий балл вспышек (таблица),

особенно в первой половине события, наблюдались очень медленный рост потока СКЛ без четко выраженных максимумов и в соответствии с этим медленное падение уровня интенсивности ГКЛ без отдельных заметных форбуш-эффектов. Высокая широта основного активного центра (АО 6659), вероятно, может быть причиной ослабления эффектов, оказываемых вспышками на ход интенсивности СКЛ и ГКЛ. Однако главными причинами являются высокая частота следования солнечных вспышек и гелиодолготное распределение СКЛ и вспышечных возмущений [12–16].

Результаты анализа позволяют сделать следующие выводы.

1. Особенность рассматриваемого события заключается в том, что интервал между солнечными вспышками оказался примерно равным времени распространения вспышечных возмущений от Солнца до детектора, поэтому среда между Солнцем и орбитой ИСЗ была постоянно весьма возмущена, что ослабляло и задерживало импульсную инъекцию СКЛ.

2. Система движущихся вспышечных возмущений модулировала, т.е. перераспределяла поток СКЛ, захваченный в динамические ловушки между ними.

3. Гелиодолготная эффективность источников СКЛ весьма существенна при распространении СКЛ и модуляции ГКЛ.

Литература

1. Чучков Е.А., Ермаков С.И., Кадобнов В.Б. и др. // Письма в Астрон. журн. 1991. 17, № 2. С. 135.

2. Ермаков С.И., Контор Н.Н., Любимов Г.П. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1991. 55, № 10. С. 1889.
3. Ермаков С.И., Контор Н.Н., Зосим Л.Е. и др. // Изв. РАН, сер. физ. 1995. 59, № 4. С. 24.
4. Ермаков С.И., Контор Н.Н., Любимов Г.П. и др. // Изв. РАН, сер. физ. 1993. 57, № 7. С. 7.
5. Chuchkov E.A., Ermakov S.I., Kontor N.N. et al. // Proc. 23 Intern. Cosmic Ray Conf. Calgary. 1993. V. 3. P. 21.
6. Chuchkov E.A., Ermakov S.I., Kontor N.N. et al. // Proc. 24 Intern. Cosmic Ray Conf. Rome. 1995. V. 4. P. 228.
7. Wibberenz, Kunow H. // Geophys. Res. Lett. 1992. 19, № 12. P. 1279.
8. Cliver E.W., Kahler S.W. // Proc. Second SOLTIP Symposium. Nakaminato, Japan, 1995. V. 5. P. 53.
9. Usmanov A.V., Dryer M. // Ibid. P. 59.
10. Solar Geophysical Data. 1990–1994. National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado.
11. Вернов С.Н., Любимов Г.П., Переслегина Н.В. // Тр. 6-й Всесоюз. зимней школы по космофизике. Апатиты (Полярный геофиз. ин-т). 1969. С. 173.
12. Ишков В.Н., Колесов Г.Я., Логачев Ю.И. и др. // Космич. исслед. 1989. 27, № 3. С. 402.
13. Ermakov S.I., Lyubimov G.P., Kontor N.N. et al. // Proc. 20 Intern. Cosmic Ray Conf. M., 1987. V. 3. P. 128.
14. Kolomeets N.N., Sevostjanov V.N., Seleznev K.B., Lyubimov G.P. // Proc. 21 Intern. Cosmic Ray Conf. Australia, Adelaide, 1990. V. 5, SH 3.2–14. P. 233.
15. Любимов Г.П., Чучков Е.А. // Космич. исслед. 1991. 29, № 6. С. 910.
16. Ермаков С.И., Любимов Г.П., Тулунов В.И. // Космич. исслед. 1995. 33, № 2, С. 128.

Поступила в редакцию
23.06.97