

Наземное возрастание интенсивности космических лучей 6 ноября 1997 г.: спектры и анизотропия

М. В. Кравцова¹⁾, В. Е. Сдобнов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033 Иркутск, Россия

Институт космических исследований и аэронавтики им. Шафера СО РАН, 677980 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 17 июля 2015 г.

После переработки 6 ноября 2015 г.

По данным наземных и спутниковых наблюдений интенсивности космических лучей (КЛ) на мировой сети станций уникальным методом спектрографической глобальной съемки, разработанным в Институте солнечно-земной физики СО РАН, исследованы вариации жесткого спектра и анизотропия КЛ в период наземного возрастания интенсивности КЛ (GLE) 6 ноября 1997 г. Определены жесткие спектры КЛ в отдельные периоды исследуемого события. Показано, что ускорение протонов в период этого GLE наблюдалось до жесткости $\sim 10\text{--}12$ ГВ, а дифференциальные жесткие спектры КЛ во время рассматриваемого события не описываются ни степенной, ни экспоненциальной функцией от жесткости частиц. На основе проведенного анализа установлено, что в момент GLE Земля находилась в петлеобразной структуре межпланетного магнитного поля.

DOI: 10.7868/S0370274X16010021

1. Введение. С 70-х гг. прошлого столетия солнечными протонными событиями (СПС) принято называть совокупность физических процессов на Солнце и в межпланетном пространстве, приводящих к выходу ускоренных протонов из Солнца, возникающих во время солнечной вспышки или коронального выброса массы (КВМ) [1, 2]. Первое свидетельство существования высокоэнергичных частиц от Солнца было обнаружено С.Е. Форбушем по внезапно возросшей интенсивности космических лучей (КЛ), зарегистрированной на наземном детекторе [3]. Наземные возрастания солнечных космических лучей (СКЛ), так называемые события GLE (Ground Level Enhancement), представляют собой особый класс СПС, регистрируемый мировой сетью станций КЛ. Это самые высокоэнергичные из возрастаний СКЛ. В настоящее время определение СПС конкретизировано. Термин “GLE” используется для событий с релятивистскими солнечными протонами, а для событий с нерелятивистскими частицами применяется термин “СПС” [4].

Начиная с 1942 г. по состоянию на вторую половину 2015 г. в каталоге GLEs зарегистрировано 72 события [5], 16 из которых произошли во время 23-го солнечного цикла [6].

Проблемой событий GLE занимается несколько десятков человек, входящих в различные исследова-

тельские группы по всему миру. Однако до сих пор нет ясного понимания особых условий, которые сопровождают эти редкие события [4, 7–11]. При более пристальном анализе событий приходится признать, что они отличаются большим разнообразием наблюдаемых энергетических спектров и отсутствием универсальности в динамике. Это связано с условиями генерации СКЛ, с процессами ускорения и распространения энергичных частиц. Поэтому исследования СКЛ важны для понимания механизмов как ускорения частиц в солнечных вспышках, так и их распространения в межпланетной среде, а анализ каждого GLE вносит важные детали в выявление механизма ускорения частиц [12–13].

В настоящей статье мы продолжаем систематическое изучение методом спектрографической глобальной съемки (СГС) серии GLE в 23-м цикле солнечной активности (1996–2008 гг.). Именно по ним имеются обширные базы данных наблюдений наземной сети, космических аппаратов и т.д. Из 16 зарегистрированных в 23-м цикле наземных возрастаний интенсивности КЛ нами уже опубликованы результаты исследований GLE59 (14.07.2000), GLE60 и GLE61 (15.04.2001 и 18.04.2001), GLE69 (20.01.2005) и GLE70 (13.12.2006) [14–17].

Целью данной работы является исследование энергетического спектра и анизотропии КЛ в период наземного возрастания интенсивности КЛ, зарегистрированного наземной сетью станций нейтронных

¹⁾e-mail: rina@iszf.irk.ru

мониторов 6 ноября 1997 г. (GLE55), которое было первым событием в 23-м солнечном цикле.

Шестого ноября 1997 г. на Солнце в активной области 8100 с координатами ($S18^\circ$, $W63^\circ$) произошла вспышка класса B2/X9.4. В линии $H\alpha$ начало вспышки имело место в $\sim 11:49$ UT с максимумом в $\sim 11:55$ UT [18]. Во время вспышки наблюдалось сильное импульсное гамма-излучение, которое длилось ~ 4 мин [19]. Данное событие вызвало КВМ, имевший скорость 1726 км/с (детально изучен в [20]) и повышение интенсивности КЛ на мировой сети станций (GLE55) (см. [5] и ссылки там). В это время геомагнитная обстановка была спокойной. Повышение интенсивности КЛ на высокоширотных нейтронных мониторах началось в $\sim 12:10$ UT. По 5-минутным данным нейтронных мониторов [21] на высокоширотной станции Апатиты (вертикальная жесткость геомагнитного обрезания R_c в этом пункте равна 0.6 ГВ) максимальная амплитуда возрастания интенсивности КЛ составила 10.4% в 13:45–13:50 UT, на среднеширотной станции Иркутск ($R_c = 3.66$ ГВ) – 4.7% в 13:05–13:10 UT, а на низкоширотной станции Мехико ($R_c = 9.53$ ГВ) – 0.9% в 12:35–12:40 UT. Максимальная амплитуда повышения интенсивности КЛ наблюдалась на станции Южный Полюс (2820 м над уровнем моря, $R_c = 0.09$ ГВ). По 2-минутным данным в 14:34–14:36 UT и в 15:02 UT она составила $\sim 18\%$. В работе [22] также отмечена двухпиковая структура амплитуды повышения интенсивности КЛ на станции Южный Полюс в период GLE55. Авторы объясняют такую структуру наличием быстрой (БК) и медленной (МК) компонент с разными энергетическими спектрами. Вероятным механизмом генерации БК является ускорение электрическим полем, возникающим при магнитном пересоединении в корональных токовых слоях. В качестве же наиболее вероятного источника МК выступает стохастический механизм ускорения плазменной турбулентностью в возмущенной плазме вспышечного или коронального выброса. По данным с часовым разрешением двухпиковости в амплитуде возрастания интенсивности КЛ на этой станции не наблюдается из-за большего периода усреднения.

2. Данные и метод. Основой для анализа послужили данные мировой сети станций нейтронных мониторов, исправленные на давление и усредненные за часовые интервалы. Амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 21 ноября 1997 г. Использовались часовые данные 38 нейтронных мониторов [21] и часовые данные с космического аппарата (КА) GOES-9 [23] (протоны в 7 энергетических

интервалах: 0.8–4, 4–9, 9–15, 15–40, 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ).

Анализ выполнен с применением метода СГС [24, 25]. В отличие от других существующих методов метод СГС позволяет использовать для анализа весь имеющийся комплекс наземной регистрирующей аппаратуры (мировую сеть нейтронных мониторов, расположенных на разных уровнях в атмосфере Земли, наземные и подземные мюонные телескопы и т.д.).

Метод СГС дает возможность наряду с фазами первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии определять жесткостной спектр вариаций изотропной составляющей. Возрастание амплитуд первой (A_1) и второй (A_2) гармоник питч-угловой анизотропии КЛ наблюдается при изменениях напряженности ММП. Это следует из модельных расчетов, выполненных в [26], где исследовалось влияние на распределение частиц по питч-углам такой структурной особенности ММП, как коротирующая магнитная ловушка. Авторами работы [26] показано, что при длинах транспортного пробега, превышающих размеры ловушки, захваченные частицы существенно замедляются и, следовательно, происходит анизотропное понижение интенсивности. Наибольшей модуляции подвержены частицы с большими питч-углами, наименьшей – движущиеся вдоль поля. В питч-угловом распределении КЛ внутри ловушки преобладают четные гармоники, амплитуда которых может достигать нескольких процентов. На выходе из ловушки в распределении частиц по питч-углам преобладают нечетные гармоники большой амплитуды, т.к. перемещения по энергетической координате у входящих и выходящих из ловушки частиц существенно различны. Поэтому на фазе роста модуля ММП (вхождение Земли в магнитную пробку – место выхода замедленных частиц из ловушки) наблюдается возрастание амплитуды первой гармоники, а на фазе спада (вхождение Земли в магнитную ловушку) – увеличение амплитуды второй гармоники питч-углового распределения КЛ. Возрастания амплитуды двунаправленной анизотропии A_2 не будет наблюдаться, если, например, Земля попадет в область южной границы магнитной структуры с повышенной напряженностью поля, а скорость дрейфа будет направлена с юга на север и если не сформирована петлеобразной структуры ММП, являющейся магнитной ловушкой. Другими словами, при выходе и входе Земли в структуры, подобные КВМ, наблюдается повышение первой гармоники питч-углового распределения, а возрастание его второй гармоники указывает на наличие в ММП петлеобразной струк-

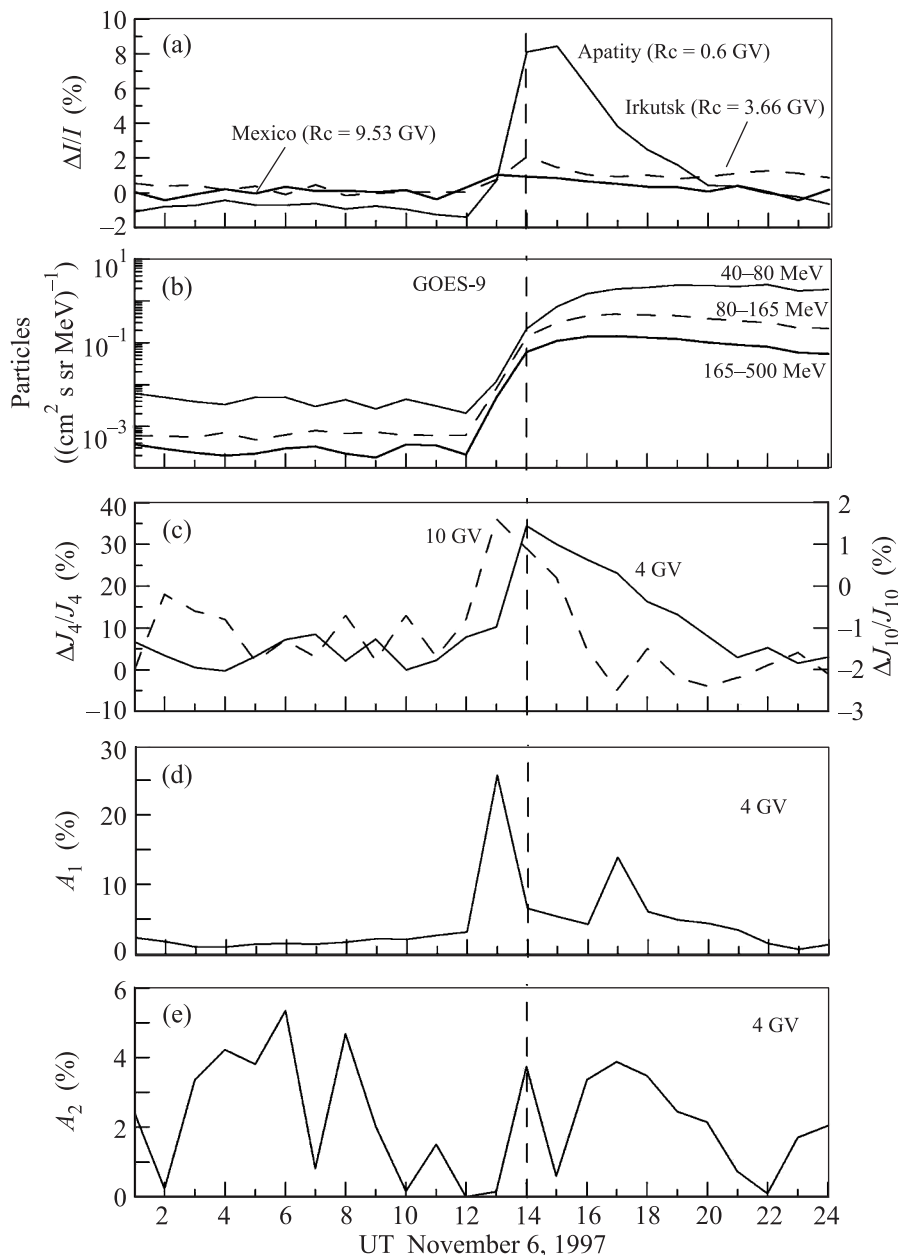


Рис. 1. (а) – Временные ходы амплитуд вариаций нейтронной компоненты КЛ на отдельных станциях мировой сети. (б) – Временной ход интенсивности протонов, зарегистрированных на КА GOES-9 в трех энергетических диапазонах. (с) – Вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 и 10 ГВ. (d), (e) – Амплитуды первой и второй гармоник пичч-углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ

туры. Кроме того, метод позволяет определять вариации планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений или за меньшие временные интервалы в периоды возмущений геомагнитного поля.

3. Результаты анализа. На рис. 1 приведены следующие данные: временные ходы часовых значений амплитуд вариаций нейтронной компоненты КЛ на отдельных станциях мировой сети в зависимо-

сти от пороговой жесткости геомагнитного обрезания; временной ход часовых значений интенсивности протонов, зарегистрированных на КА GOES-9 в трех энергетических диапазонах (40–80, 80–165 и 165–500 МэВ); рассчитанные методом СГС временные ходы часовых вариаций изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостями 4 и 10 ГВ и амплитуды первой (A_1) и второй (A_2) гармоник пичч-углового распределения КЛ с жестко-

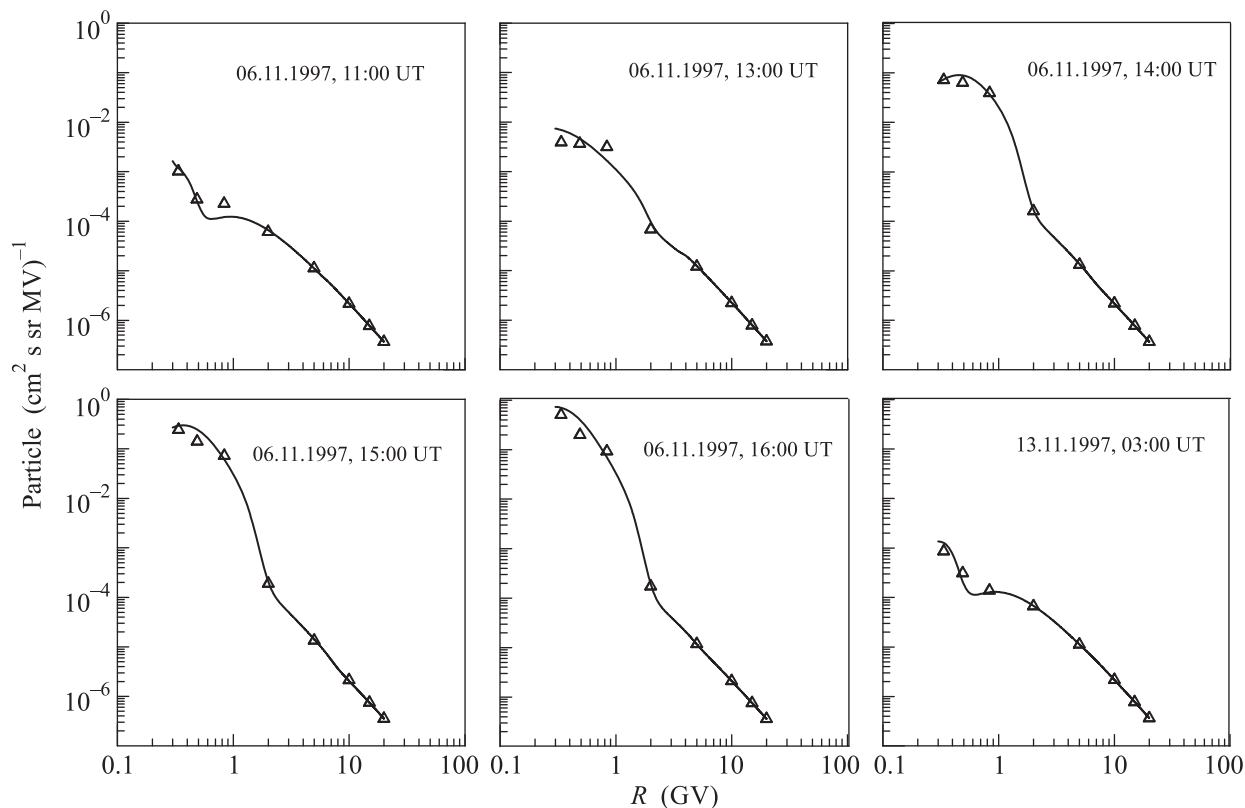


Рис. 2. Дифференциальные жесткостные спектры КЛ (сплошная кривая – результаты расчетов, треугольники – данные наблюдений)

стью 4 ГВ. Выбор жесткости 4 ГВ обусловлен, с одной стороны, близостью этой величины к жесткости геомагнитного обрезания в Иркутске ($R_c = 3.66$ ГВ), а с другой – тем, что максимальные значения коэффициентов связи для среднеширотных станций находятся в пределах 3–6 ГВ, т.е. в этом диапазоне жесткостей корни системы уравнений при решении обратной задачи определяются с наименьшими погрешностями.

Из рис. 1а видно, что на высокоширотной станции Апатиты (высота наблюдения 177 м, $R_c = 0.6$ ГВ) амплитуда эффекта в часовом усреднении $\sim 7\%$, на среднеширотной станции Иркутск (высота наблюдения 465 м, $R_c = 3.66$ ГВ) ее величина составляет $\sim 1.5\%$, а на низкоширотной станции Мехико (высота наблюдения 2274 м, $R_c = 9.53$ ГВ) она менее 1%. Факт увеличения амплитуды вариаций КЛ на станции Мехико говорит о том, что на орбиту Земли пришли протоны, ускоренные до жесткостей свыше ~ 10 ГВ. В работе [27] получено экспериментальное подтверждение прихода в событии GLE55 солнечных протонов с энергией выше 10 ГэВ на установке Milagrito, которая регистрирует КЛ с энергией выше 5 ГэВ.

Начиная с 14:00 UT 6 ноября (см. рис. 1b) потоки протонов на орбите Земли в диапазонах 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ выросли на ~ 1.5 –2 порядка по сравнению с потоками частиц в 12:00 UT.

Из рис. 1с видно, что максимальная амплитуда вариаций для частиц с жесткостью 10 ГВ наблюдается примерно на 1 ч раньше, чем для частиц с жесткостью 4 ГВ. Поток протонов с жесткостью 4 ГВ на границе магнитосферы Земли в 14:00 UT увеличился на $\sim 27\%$, а поток протонов с жесткостью 10 ГВ в 13:00 UT – на $\sim 1\%$ относительно потоков в 12:00 UT.

Непосредственно перед началом GLE (в 13:00 UT) наблюдалось повышение амплитуды A_1 первой сферической гармоники пичч-углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ до $\sim 27\%$ (см. рис. 1d). В момент GLE (в 14:00 UT) возросла амплитуда двунаправленной анизотропии A_2 до $\sim 4\%$ (см. рис. 1e), что свидетельствует о петлеобразной структуре ММП [13].

С использованием выражения для жесткостного спектра КЛ, полученного в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [13], по данным измерений на КА GOES-9 и мировой сети станций КЛ нами были рассчитаны

дифференциальные жесткостные спектры КЛ на орбите Земли. На рис. 2 представлены спектры для периодов перед началом GLE, на начальной фазе события, в его максимальной фазе и в момент, когда ситуация вернулась к довысшыпечному состоянию (03:00 UT 13 ноября 1997 г.). Треугольники соответствуют данным наблюдений на КА GOES-9 (до жесткости ~ 1 ГВ) и результатам, полученным методом СГС по данным мировой сети станций КЛ (для жесткостей выше ~ 2 ГВ). Кривая – аппроксимация этих данных с помощью методики, описанной в работе [13].

Из рис. 2 видно, что используемый вид спектра хорошо описывает наблюдаемую зависимость интенсивности КЛ от их жесткости. Рассчитанные спектры протонов на орбите Земли в период GLE не являются степенными в широком диапазоне энергий. Последнее подтверждает результат работы [6]. В ней где на основе данных измерений на КА до энергии ~ 100 МэВ и расчетов по измерениям интенсивности КЛ на мировой сети станций при энергиях выше ~ 400 МэВ показано, что интегральный спектр КЛ в период GLE55 в диапазоне от единиц МэВ до ~ 10 ГэВ не является степенным. Тем не менее некоторые авторы в предположении степенного спектра СКЛ в период GLE (см., например, [22]) для характеристики события оперируют величиной показателя степенного спектра γ . Так, в работе [22] в период данного события для МК приведено значение $\gamma \sim -4.6$, а в работе [28] авторы рассчитали разными методами показатель жесткостного степенного спектра в диапазоне жесткостей 1–10 ГВ и получили значения этого параметра от -6.0 до -7.3 . Мы аппроксимировали полученные нами спектры КЛ степенной функцией по жесткости в диапазоне 1–10 ГВ, хотя, как видно из рис. 2, эти спектры не являются степенными. Кроме того, мы разбили жесткостной интервал 1–10 ГВ на два участка 1–3 и 3–10 ГВ, на которых спектры близки к степенным по жесткости частиц, и также рассчитали для этих диапазонов показатель спектра. Полученные значения показателя степени приведены в табл. 1.

Таблица 1. Показатель степени жесткостного спектра КЛ

Время, UT	Жесткостной интервал, ГВ		
	1–10	1–3	3–10
13:00	-2.54	-3.42	-2.39
14:00	-3.38	-6.06	-2.73
15:00	-3.43	-6.35	-2.71
16:00	-3.43	-6.41	-2.71

Из таблицы видно, что при рассмотрении спектров КЛ в указанных диапазонах жесткостей как

степенных по мере развития GLE спектры смягчаются. На начальной стадии данного события спектр КЛ наиболее жесток. Полученные в данной работе значения показателя степени в диапазоне жесткостей 1–3 ГВ близки по величине к значениям из работы [28] для более широкого их диапазона. Последнее можно объяснить тем, что в работе [28] результаты по величине показателя степени получены по данным двух станций КЛ, разнесенных по пороговой жесткости геомагнитного обрезания всего на ~ 0.2 ГВ (гора Вашингтон, $R_c = 1.41$ ГВ, и Дурхэм, $R_c = 1.59$ ГВ), а по высоте – на 1900 м. По нашему мнению, этого недостаточно для получения спектров КЛ в диапазоне жесткостей 1–10 ГВ. Скорее всего, их результат по величине показателя жесткостного спектра КЛ относится к более узкому диапазону жесткостей, близкому к диапазону 1–3 ГВ. В [22] приведен показатель предельного интегрального спектра СКЛ (~ 2.2) при энергии выше 1 ГэВ. Данное значение близко к показателю интегрального спектра для GLE55 в диапазоне жесткостей 1–10 ГВ в период 14:00–16:00 UT.

На рис. 3 представлены жесткостные спектры вариаций КЛ на разных фазах развития GLE. На на-

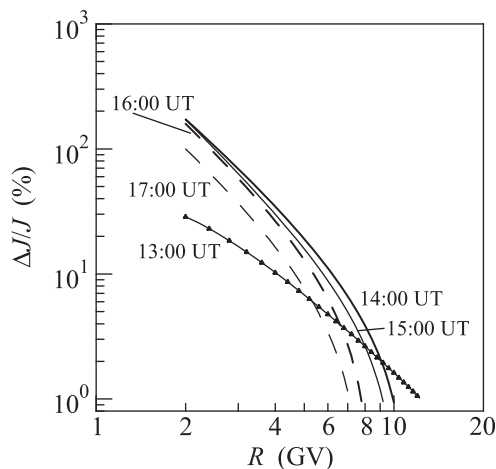


Рис. 3. Жесткостные спектры вариаций КЛ на разных фазах развития GLE55

чальной стадии данного события (в 13:00 UT) спектр вариаций близок к степенному с показателем $\gamma \sim -2.00$. В последующие моменты времени спектры вариаций не являются степенными. Максимальная жесткость ускоренных протонов в (13:00 UT) по результатам обработки данных мировой сети методом СГС составила ~ 10 –12 ГВ. В последующие моменты этого события ускоренные частицы с жесткостью выше ~ 8 –9 ГВ не наблюдаются.

На рис. 4 приведены относительные изменения интенсивности КЛ с жесткостью 4 ГВ в зависимо-

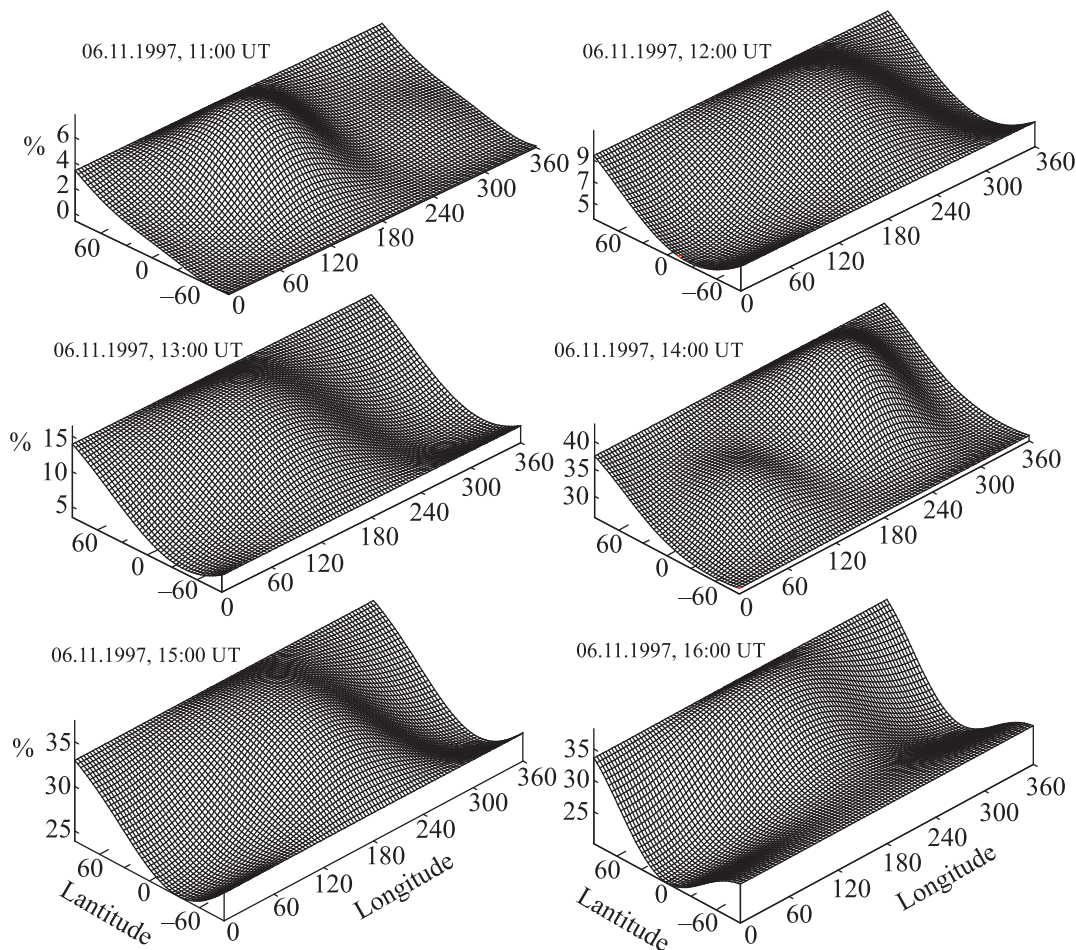


Рис. 4. Относительные изменения интенсивности КЛ с жесткостью 4 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени события GLE55

сти от асимптотических направлений в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат в отдельные моменты времени исследуемого события. По оси абсцисс отложены значения долготного угла, а по оси ординат – широтного угла. Как следует из рисунка, в 11:00–13:00 UT доминирует первая гармоника. В это время интенсивность КЛ повысилась на $\sim 7\%$ из направления $\psi \sim 135^\circ$, $\lambda \sim 25^\circ$, на $\sim 12\%$ из направления $\psi \sim 200^\circ$, $\lambda \sim 25^\circ$ и на $\sim 17\%$ из направления $\psi \sim 140^\circ$, $\lambda \sim 35^\circ$. В 14:00 UT ярко выражена двунаправленная анизотропия с повышенной интенсивностью из направлений $\psi \sim 90^\circ$, $\lambda \sim 5^\circ$; $\psi \sim 250^\circ$, $\lambda \sim 40^\circ$. В 15:00–16:00 UT снова видна первая гармоника, а интенсивность КЛ была повышена на $\sim 35\%$ из направления $\psi \sim 185^\circ$, $\lambda \sim 25^\circ$ и из направления $\psi \sim 185^\circ$, $\lambda \sim 65^\circ$.

4. Выводы. На основании приведенных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Ускорение протонов в период GLE55 наблюдалось до жесткости ~ 10 – 12 ГВ.

2. Спектры КЛ в период GLE55 в широком жесткостном диапазоне не описываются ни степенной, ни экспоненциальной функциями жесткости частиц.

3. При аппроксимации спектров КЛ в жесткостном диапазоне от 1 до 3 ГВ показатель степени составляет примерно от -6.0 до -6.4 .

4. В распределении КЛ по направлениям прихода к Земле во время GLE (14:00 UT) присутствует вторая гармоника пичч-углового распределения КЛ. Ее появление свидетельствует о том, что в это время Земля находилась внутри КВМ с петлеобразной структурой ММП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект # 14-12-00760) «Исследования природы солнечных космических лучей и штормовых частиц».

1. Л. И. Мирошниченко, *Космические лучи в межпланетном пространстве* Наука, М. (1973), 160 с.
2. <http://www.infosait.ru>

3. S. E. Forbush, Phys. Rev. **70**, 771 (1946).
4. L. I. Miroshnichenko, *Solar Cosmic Rays: Fundamentals and Applications*, Springer (2014), 521 p.
5. <http://www.nmdb.eu>
6. <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/SPE 1997 – 2009>
7. M. A. El-Borie, Astroparticles Phys. **19**, 549 (2003).
8. N. Gopalswamy, S. Xie, J. Yashiro, and I. Usoskin, Indian J. Radio. Space. Phys. **39**, 240 (2010).
9. А. В. Белов, Е. А. Ерошенко, О. Н. Крякунова, В. Г. Курт, В. Г. Янке, Геомагнетизм и аэрономия **50**(1), 23 (2010).
10. N. V. Nitta, Y. Liu, M. L. DeRosa, and R. W. Nightingale, Space Sci. Rev. **171**(1–4), 61 (2012).
11. L. I. Miroshnichenko, *Solar Cosmic Rays*, Springer (2001), 480 p.
12. Г. Ф. Крымский, *Модуляция космических лучей в межпланетном пространстве*, Наука, М. (1969), 153 с.
13. В. М. Дворников, М. В. Кравцова, В. Е. Сдобнов, Геомагнетизм и аэрономия **53**(4), 1 (2013).
14. М. В. Кравцова, В. Е. Сдобнов, Изв. РАН. Сер. физ. **77**(5), 602 (2013).
15. М. В. Кравцова, В. Е. Сдобнов, *Труды Всероссийской конференции по солнечно-земной физике, посвященной 100-летию со дня рождения члена корреспондента РАН В. Е. Степанова*, Иркутск (2013), с. 86.
16. В. М. Дворников, М. В. Кравцова, А. А. Луковникова, В. Е. Сдобнов, Изв. РАН, Сер. физ. **71**(7), 975 (2007).
17. В. М. Дворников, М. В. Кравцова, В. Е. Сдобнов, *Труды XI конференции молодых ученых БИФФ-2009 Иркутск* (2009), с. 259.
18. Solar-Geophys. Data **640**, 1 (1997).
19. M. Yoshimori, K. Suga, S. Nakayama, H. Takeda, H. Ogawa, R. J. Murphy, and G. H. Share, Adv. Space Res. **30**(3), 629 (2002).
20. D. Maia, A. Vourlidas, M. Pick, R. Howard, R. Schwenn, and A. Magalhaes, J. Geophys. Res. **104**, 12507 (1999).
21. <ftp://cr0.izmiran.rssi.ru>.
22. Л. И. Мирошниченко, Э. В. Вашенюк, Х. А. Перес-Пераса, Геомагнетизм и аэрономия **53**(5), 579 (2013).
23. <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.html>
24. V. M. Dvornikov, V. E. Sdobnov, and A. V. Sergeev, *Proc. 18 International Cosmic Ray Conference, Bangalore, India* (1983), 249.
25. V. M. Dvornikov and V. E. Sdobnov, IJGA **3**(3), 217 (2003).
26. В. М. Дворников, Ю. Г. Матюхин, Изв. АН СССР. Сер. физ. **43**(12), 2573 (1979).
27. J. M. Ryan (Milagro Collaboration), *Proc. 26 Int. Cosmic Ray Conference, Salt Lake City, USA* (1999), v. 6, p. 378.
28. J. A. Lockwood, Y. Debrunner, E. O. Flueckiger, and J. M. Ryan, Solar Phys. **208**(1), 113 (2002).