

НАЗЕМНОЕ ВОЗРАСТАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ФАЗЕ СПАДА 24 СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА: СПЕКТРЫ И АНИЗОТРОПИЯ

Кравцова М.В. (Skype - live:d682881c178d042f), Сдобнов В.Е. (E-mail - sdobnov@iszf.irk.ru)

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск

По данным наземных и спутниковых наблюдений интенсивности космических лучей (КЛ) на мировой сети станций методом спектрографической глобальной съемки, разработанном в ИСЗФ СО РАН, исследованы вариации жесткостного спектра и анизотропия КЛ в период наземного возрастания интенсивности КЛ (GLE) 10 сентября 2017 г.

Определены жесткостные спектры КЛ в отдельные периоды исследуемого события. Показано, что ускорение протонов в период этого GLE наблюдалось до жесткости ~5–7 ГВ, а дифференциальные жесткостные 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.

1. ВВЕДЕНИЕ Солнечные протонные события (СПС) в основном наблюдаются вблизи максимума 11-летнего цикла, но могут появляться и на фазе спада активности. В текущем 24-м солнечном цикле, при приближении к минимуму в первой декаде сентября 2017 г. Солнце характеризовалось аномально высокой активностью, связанной с быстрым развитием на видимом диске крупной группы пятен активной области 12673. За период с 4–10 сентября было зарегистрировано 27 вспышек M-класса и 4 вспышки X-класса, причем три из них: 4 сентября (M5.5), 6 сентября (X 9.3) и 10 сентября (X8.2) по данным коронографа SOHO/LASCO (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/halo.htm) сопровождалась крупными корональными выбросами массы (КВМ) типа гало. Особый интерес исследователей вызвало мощное СПС произошедшее 10 сентября 2017 г. после продолжительной прилимовой вспышки балла X8.2 (координаты расположения S09W92, время начала вспышки ~ в 15:38 UT, а основной выброс энергии вспышки наблюдался ~ 16:00 UT), породившей сверхбыстрый КВМ с линейной скоростью ~ 3136 км/с. СПС было достаточно энергичным, чтобы сгенерировать ливень вторичных частиц в атмосфере Земли, который затем был зарегистрирован мировой сетью станций нейтронных мониторов (НМ) в виде GLE (наземное возрастание интенсивности космических лучей (КЛ)), записанное как GLE72 в базе данных (<http://gle.oulu.fi>). Это второе GLE за весь 24 цикл, остальные возрастания интенсивности КЛ классифицируются как суб-GLE. Мы решили внести свой вклад в изучение некоторых характеристик GLE72, используя метод спектрографической глобальной съемки (СГС) (Dvornikov and Sdobnov // *Solar Phys.* 1998. V. 178 (2). P. 405–422).

10 сентября 2017 г. ~ 16:15 UT мировой сетью станций КЛ было зарегистрировано начальное повышение интенсивности нейтронной компоненты КЛ. Особенностью этого события является то, что оно произошло на фазе восстановления Форбуш-понижения, начавшегося после геомагнитной бури 7 сентября 2017 г. Нейтронный монитор, расположенный на станции Форт Смит (высота наблюдения на уровне моря, $R_c=0.3$ ГВ), первым (16:06–16:08 UT) зафиксировал прибытие высокоэнергичных частиц на Землю, а НМ на станции Южный Полюс (высота наблюдения 2820 м, $R_c=0.10$ ГВ) зафиксировал это событие чуть позднее, но с наибольшей амплитудой (~ 8%). На высокогорных среднеширотных станциях Алматы (высота наблюдения 3340 м, $R_c=6.69$ ГВ) и Ломнишки-Штит (высота наблюдения 2684 м, $R_c=3.84$ ГВ) наблюдалось увеличение амплитуды вариаций КЛ менее 1 %, что указывает на то, что на орбиту Земли пришли протоны, ускоренные до жесткостей выше 6 ГВ.

Целью настоящей работы является получение энергетических спектров в широком диапазоне энергий и анизотропии КЛ в период GLE72.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД Для анализа GLE в нерелятивистском диапазоне энергий использовались часовые данные измерений протонов на орбите Земли с космического аппарата (КА) GOES-15 (http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg) (протоны в 7 энергетических интервалах 0.8–4, 4–9, 9–15, 15–40, 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ, при релятивистских энергиях – результаты обработки усредненных за часовые интервалы данные наземных измерений на мировой сети нейтронных мониторов (38 станции) (www.nmdb.eu, ИЗМИРАН). Амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 6 сентября 2017 г. Выбор спокойного периода обусловлен тем, что в этот период по сравнению с периодом, когда наблюдалось GLE, электромагнитная обстановка в межпланетном пространстве и геомагнитная обстановка были спокойными, а спектр галактических КЛ наименее модулирован.

Анализ выполнен с применением метода СГС. В отличие от 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, а также наземные и подземные мюонные телескопы и т. д.). Метод СГС дает возможность, наряду с фазами первой (A1) и второй (A2) гармоник пичч-угловой анизотропии, определять жесткостной спектр вариаций изотропной составляющей. Возрастание амплитуд A1 и A2 (двунаправленной) гармоник пичч-угловой анизотропии КЛ наблюдается при изменениях напряженности ММП. На фазе роста модуля ММП (вхождение Земли в магнитную пробку – место выхода замедленных частиц из ловушки) наблюдается возрастание амплитуды A1, на фазе спада (вхождение Земли в магнитную ловушку) – увеличение амплитуды A2. Возрастание амплитуды двунаправленной анизотропии не будет наблюдаться в случаях: если, например, Земля попадет в область южной границы магнитной структуры с повышенной напряженностью поля, а скорость дрейфа направлена с юга на север, и если не сформируется петлеобразная структура ММП, являющаяся магнитной ловушкой. Другими словами, при входе и выходе Земли в структуры подобные КВМ наблюдается повышение A1, а возрастание A2 указывает на наличие в ММП петлеобразной структуры. 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 временные ходы часовых значений амплитуд вариаций нейтронной компоненты КЛ на отдельных НМ мировой сети в зависимости от пороговой жесткости геомагнитного обрезания; временной ход часовых значений интенсивности протонов, зарегистрированных на КА GOES-15 в трех энергетических диапазонах 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ; рассчитанные методом СГС временной ход часовых вариаций изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 ГВ обусловлен с другой стороны близостью этой величины к жесткости геомагнитного обрезания в Иркутске ($R_c=3.66$ ГВ), с другой стороны 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.

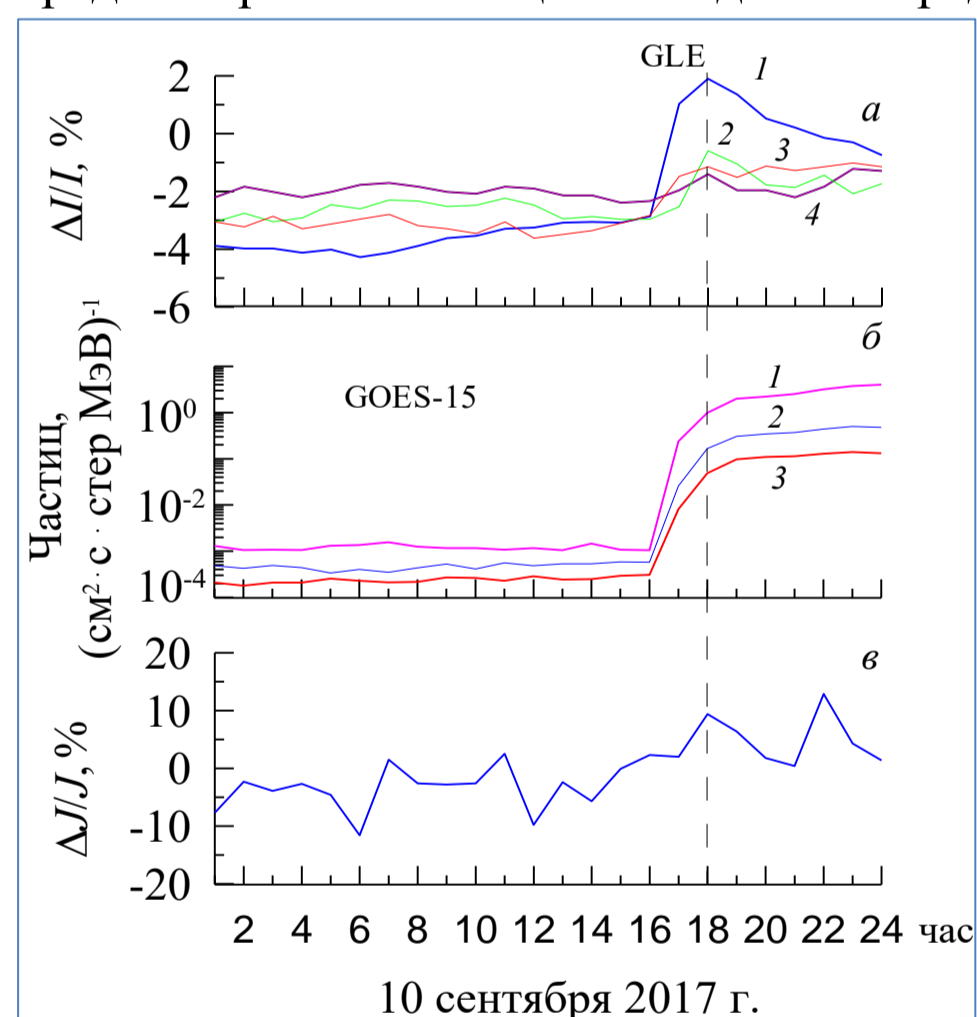


Рис. 1. а – временные ходы амплитуд вариаций нейтронной компоненты КЛ на отдельных станциях мировой сети (1 – Форт Смит ($R_c = 0.3$ ГВ), 2 – Москва ($R_c = 2.43$ ГВ), 3 – Иркутск ($R_c = 3.64$ ГВ), 4 – Ломнишки-Штит ($R_c = 3.84$ ГВ)); б – временной ход интенсивности протонов, зарегистрированных на КА GOES-15 в трех энергетических диапазонах (1 – 40–80 МэВ, 2 – 80–165 МэВ, 3 – 165–500 МэВ); в – вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 ГВ.

Из рис. 1а видно, что относительно выбранного уровня отсчета амплитуда эффекта в часовом усреднении на высокоширотной станции Форт Смит (высота наблюдения на уровне Земли, $R_c=0.0$ ГВ) составляет ~ 6%, на среднеширотных: станции Москва (высота наблюдения 200 м, $R_c=2.39$ ГВ) – ~ 4% и станции Иркутск (высота наблюдения 3000 м, $R_c=6.64$ ГВ) – ~ 2 %, Ломнишки-Штит (высота наблюдения 2684 м, $R_c=3.84$ ГВ) амплитуда эффекта менее 1%.

Начиная с 16:00 UT 10 сентября (см. рис. 1б), 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 15:00 UT.

На рис. 1в видно, что поток протонов с жесткостью 4 ГВ на границе магнитосферы Земли в 18:00 UT увеличился на ~ 7% относительно потока в 17:00 UT.

Используя выражение для жесткостного спектра КЛ, полученного в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы (Dvornikov et al. // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013. V. 53. N 4. P. 430) по данным измерений на КА GOES-15 и мировой сети станций КЛ нами были рассчитаны дифференциальные жесткостные спектры КЛ на орбите Земли.

Из рис. 2а видно, что используемый вид спектра хорошо описывает наблюдаемую зависимость интенсивности КЛ от их жесткости. Дифференциальный жесткостной спектр солнечных КЛ в этот период не описывается ни степенной, ни экспоненциальной функцией от жесткости частиц в широком диапазоне жесткостей. Однако эти спектры приближенно можно описать в узком диапазоне. Мы аппроксимировали полученные нами спектры КЛ степенной функцией по жесткости. По мере развития GLE спектры становятся более жесткими, если на начальной стадии данного события показатель спектра γ составляет порядка 7–10, к концу события – 4–5. Полученные нами значения показателя степени близки по величине к значениям, полученным в работе (Mishev et al., *Solar Phys.* 2018. 293. 136).

На рис. 2б представлены жесткостные спектры вариаций КЛ в последовательные моменты времени развития GLE72 относительно уровня 16:00–17:00 UT. Очевидно, что спектры вариаций КЛ не являются степенными. Максимальная жесткость ускоренных протонов в 18:00 UT (спустя два часа после GLE72) по результатам обработки данных мировой сети методом СГС составила ~ 7 ГВ. В последующие моменты этого события ускоренные частицы с жесткостью выше ~ 4–5 ГВ не наблюдаются.

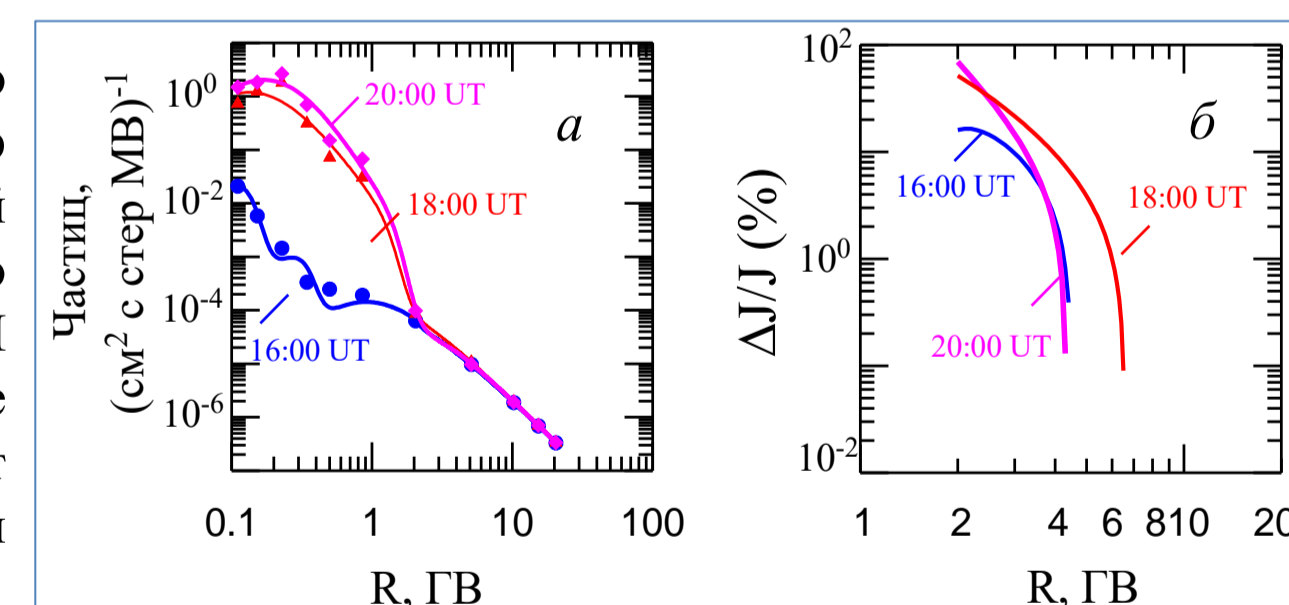


Рис. 2. а – дифференциальные жесткостные спектры КЛ (кривые – результаты расчетов, значки – данные наблюдений); б – жесткостные спектры вариаций КЛ в отдельные моменты времени развития GLE72.

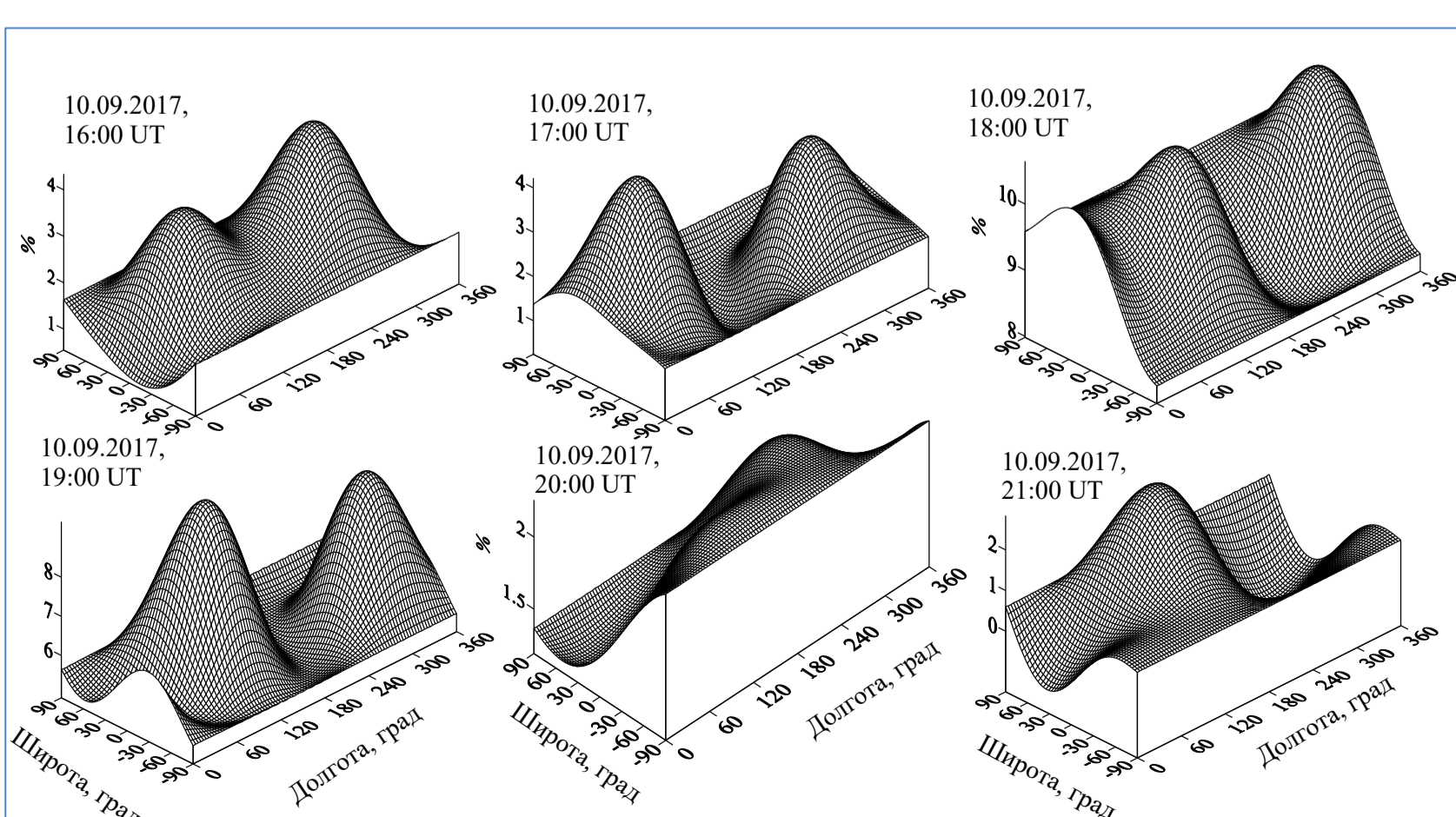


Рис. 3. Относительные изменения интенсивности КЛ с жесткостью 4 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени GLE72.

На рис. 3 приведены относительные изменения интенсивности КЛ с жесткостью 4 ГВ в зависимости 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 16:00–19:00 UT ярко выражена двунаправленная анизотропия с повышенной интенсивностью из направлений ~120°, ~8° и ~325°, ~18°. В 20:00–21:00 UT видна первая гармоника. Появление A2 свидетельствует о петлеобразной структуре ММП (Dvornikov et al. // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013. V. 53. N 4. P. 430).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании приведенных результатов можно сделать вывод:

1. Ускорение протонов в период GLE72 наблюдалось до жесткости ~ 7 ГВ;
2. Спектры КЛ в период GLE72 в широком диапазоне не описываются ни степенной, ни экспоненциальной функцией от жесткости частиц;
3. По мере развития GLE спектры становятся более жесткими, показатель спектра γ изменяется от 10 до 4.
4. В распределении КЛ по направлениям прихода к Земле во время GLE (18:00 UT) присутствует вторая гармоника пичч-углового распределения КЛ, появление которой свидетельствует о том, что в это время Земля находилась внутри КВМ с петлеобразной структурой ММП.