УДК 521.4

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

© 2021 г. М. В. Кравцова^{1, *}, В. Е. Сдобнов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия *E-mail: rina@iszf.irk.ru Поступила в редакцию 25.02.2021 г. После доработки 12.03.2021 г. Принята к публикации 28.04.2021 г.

По данным наземных и спутниковых наблюдений интенсивности космических лучей на мировой сети станций методом спектрографической глобальной съемки исследованы вариации жесткостного спектра и анизотропия в период наземного возрастания интенсивности космических лучей 10 сентября 2017 г. Показано, что ускорение протонов в период этого события наблюдалось до жесткости ~5–7 ГВ.

DOI: 10.31857/S0367676521080147

ВВЕДЕНИЕ

За период 4-10 сентября 2017 г. было зарегистрировано 27 вспышек М-класса и 4 вспышки Х-класса, причем три из них: 4 сентября (М5.5), 6 сентября (Х 9.3) и 10 сентября (Х8.2) по данным коронографа SOHO/LASCO [1] сопровождались крупными корональными выбросами массы (КВМ) типа гало. Особый интерес исследователей вызвало мощное СПС, произошедшее 10 сентября 2017 г., после продолжительной прилимбовой 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, например [2-4]. СПС было достаточно энергичным, чтобы сгенерировать ливень вторичных частиц в атмосфере Земли, который затем был зарегистрирован мировой сетью станций нейтронных мониторов (HM) в виде GLE (наземное возрастание интенсивности космических лучей (КЛ)), записанное как GLE72 в базе данных [5]. В 24 солнечном цикле зарегистрировано всего два заметных возрастания интенсивности КЛ, и GLE72 стало вторым [6-8]. GLE72 также наблюдалось аппаратом, вращающимся вокруг Луны [9] и в дозиметрическом эксперименте на поверхности Марса [10].

10 сентября 2017 г. ~16:15 UT мировой сетью станций КЛ было зарегистрировано начальное повышение интенсивности нейтронной компо-

ненты КЛ. Особенностью этого события является то, что оно произошло на фазе восстановления Форбуш-понижения, начавшегося после геомагнитной бури 7 сентября 2017 г. НМ, расположенный на ст. Форт Смит ($R_c = 0.3$ ГВ), первым (16:06–16:08 UT) зафиксировал прибытие высокоэнергичных частиц на Землю, а НМ на ст. Южный Полюс ($R_c = 0.10$ ГВ) зафиксировал это событие чуть позднее, но с наибольшей амплитудой (~8%). На высокогорных среднеширотных ст. Алматы ($R_c = 6.69$ ГВ) и Ломницкий Штит ($R_c =$ = 3.84 ГВ) наблюдалось увеличение амплитуды вариаций КЛ менее 1%, что указывает на то, что на орбиту Земли пришли протоны, ускоренные до жесткостей свыше 6 ГВ.

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

ДАННЫЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа GLE в нерелятивистском диапазоне энергий использовались часовые данные измерений протонов на орбите Земли с космического аппарата (KA) GOES-15 [11] (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 HM (38 станции) [12]. 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 [13]. В отличие от существующих методов, метод СГС позволяет использовать для анализа весь имеющийся комплекс наземной регистрирующей аппаратуры (мировую сеть НМ, 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 и второй гармоник питч-угловой анизотропии, определять жесткостной спектр вариаций изотропной составляющей.

Для расчета дифференциальных спектров КЛ использовано выражение, полученное в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а приведены временные хода 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. Выбор жесткости 4 ГВ обусловлен с одной стороны близостью этой величины к жесткости геомагнитного обрезания в Иркутске ($R_c = 3.64 \ \Gamma B$), 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.

Из рис. 1*а* видно, что относительно выбранного уровня отсчета амплитуда эффекта в часовом осреднении на высокоширотной НМ Форт Смит ($R_c = 0.30$ ГВ) составляет ~6%, на среднеширотных НМ: Москва ($R_c = 2.39$ ГВ) – ~4% и Иркутск ($R_c = 3.64$ ГВ) – ~2%, Ломницкий Штит ($R_c = 3.84$ ГВ) амплитуда эффекта менее 1%.

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



Рис. 1. Временной ход амплитуд вариаций нейтронной компоненты КЛ на отдельных станциях мировой сети ($I - \Phi$ орт Смит ($R_c = 0.30$ ГВ), $2 - Москва (<math>R_c =$ = 2.43 ГВ), $3 - Иркутск (<math>R_c = 3.64$ ГВ), 4 - Ломниц $кий Штит (<math>R_c = 3.84$ ГВ)) (a); временной ход интенсивности протонов, зарегистрированных на КА GOES-15 в трех энергетических диапазонах (1 - 40 -80, 2 - 80 - 165, 3 - 165 - 500 МэВ) (b); вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 ГВ (b).

На рис. 1*в* 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.

Рассчитанные дифференциальные жесткостные спектры КЛ на орбите Земли в рамках модели [14] по данным измерений на KA GOES-15 и мировой сети НМ представлены на рис. 2а. Видно, что используемый вид спектра хорошо описывает наблюдаемую зависимость интенсивности КЛ от их жесткости. Дифференциальный жесткостной спектр СКЛ 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 у составляет порядка 7-10, к концу события - 4-5. Полученные нами значения показателя степени близки по величине к значениям, полученным в работе [6].



Рис. 2. Дифференциальные жесткостные спектры КЛ (кривые – результаты расчетов, значки – данные наблюдений) (*a*); жесткостные спектры вариаций КЛ в отдельные моменты времени развития GLE72 (*1*–16:00 UT, *2*–18:00 UT, *3*–20:00 UT) (*б*).

На рис. 26 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.

10 сентября 2017 г. в 16:00—19:00 UT наблюдалась двунаправленная анизотропия с повышенной интенсивностью из направлений ~120°, ~8° и ~325°, ~18°. Появление A_2 свидетельствует о петлеобразной структуре ММП [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании приведенных результатов можно сделать следующие выводы. Ускорение протонов в период GLE72 наблюдалось до жесткости ~7 ГВ. Спектры КЛ в период GLE72 в широком диапазоне не описываются ни степенной, ни экспоненциальной функцией от жесткости частиц. По мере развития GLE спектры становятся более жесткими, показатель спектра у изменяется от 10 до 4. В распределении КЛ по направлениям прихода к Земле во время GLE присутствует вторая гармоника питч-углового распределения КЛ, появление которой свидетельствует о том, что в это время Земля находилась внутри КВМ с петлеобразной структурой ММП. Полученные результаты могут быть полезны при разработке моделей генерации СКЛ и их распространении до орбиты Земли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Ангара" http://ckp-rf.ru/ ckp/3056/ и Уникальной научной установки "Российская национальная наземная сеть станций космических лучей" (Сеть СКЛ) [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/halo.htms.
- Gopalswamy N., Yashiro S., Mäkelä P. et al. // Astrophys. J. Lett. 2018. V. 863. No. 2. Art. No. L39.
- Seaton D.B., Darnel J.M. // Astrophys. J. Lett. 2018. V. 852. Art. No. L9.
- Zhao M.-X., Le G.-M., Chi Y.-T. // Astron. Astrophys. 2018. V. 18. No. 7. Art. No. 074.
- 5. http://gle.oulu.fi.
- Mishev A., Usoskin I., Raukunen O. et al. // Solar Phys. 2018. V. 293. P. 136.
- 7. Augusto C.R.A., Navia C.E., de Oliveira M.N. et al. // Astron. Soc. Pac. 2019. V. 131. Art. No. 024401.
- Kurt V., Belov A., Kudela K. et al. // Solar Phys. 2019.
 V. 294. No. 2. P. 22.
- 9. Schwadron N.A., Rahmanifard F., Wilson J. // Space Weather. 2018. V. 16. P. 289.
- Ehresmann B., Hassler D.M., Zeitlin C. et al. // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. P. 5305.
- 11. http://satdat.ngdc.noaa.gov./sem/goes/data/new_avg.
- 12. www.nmdb.eu.
- Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. // Solar Phys. 1998.
 V. 178. No. 2. P. 405.
- Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. // Геомагн. и аэроном. 2013. Т. 53. № 4. С. 457; Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. // Geomagn. Aeronomy. 2013. V. 53. No. 4. Р. 430.
- 15. https://ckp-rf.ru/usu/433536.

Ground-level enhancement in cosmic ray intensity at the decay phase of 24 solar cycle: spectra and anisotropy

M. V. Kravtsova^{*a*, *}, V. E. Sdobnov^{*a*}

^aInstitute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia *e-mail: rina@iszf.izk.ru

Based on data of ground-based and satellite observations of cosmic ray intensity at the worldwide network of stations, rigidity spectrum variations and anisotropy during the ground-level enhancement in cosmic ray intensity on September 10, 2017 were investigated using the spectrographic global survey method. It was shown that during this event proton acceleration to rigidity \sim 5–7 GV was observed.