Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 81–84.

УДК 524.1
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-81
ORCID 0000-0001-7155-6370

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЛАБЫХ GLE 25-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА: 8 ИЮНЯ (GLE75) И 21 НОЯБРЯ (GLE76) 2024 Г.

И.И. Ковалёв[1], М.В. Кравцова[1], С.В. Олемской[1], В.Е. Сдобнов[1]

[1]Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, ivankov@iszf.irk.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO WEAK GLEs OF SOLAR CYCLE 25: JUNE 8 (GLE 75) AND NOVEMBER 21 (GLE 76), 2024

I.I. Kovalev[1], M.V. Kravtsova[1], S.V. Olemskoy[1], V.E. Sdobnov[1]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ivankov@iszf.irk.ru

Аннотация. Методом спектрографической глобальной съемки проведен анализ двух слабых наземных возрастаний интенсивности космических лучей (КЛ): 8 июня (GLE75) и 21 ноября (GLE76) 2024 г. Использованы данные мировой сети станций нейтронных мониторов (5-минутные) и данные космических аппаратов GOES-16 и 18. Получены дифференциальные жесткостные спектры солнечных КЛ и определены максимальные жесткости, до которых произошло ускорение протонов в этих событиях. Установлено, что максимальная жесткость ускоренных частиц для обоих GLE не превысила ~2–3 ГВ. Приведены пространственные распределения первичных частиц с жесткостью 2 ГВ. Обнаружена двунаправленная анизотропия, которая свидетельствует о нахождении Земли в петлеобразной структуре межпланетного магнитного поля.

Ключевые слова: космические лучи, наземные возрастания интенсивности.

Abstract. Using the spectrographic global survey method, we carried out an analysis of two weak ground level enhancements of cosmic rays: June 8th (GLE75) and November 11th (GLE76), 2024. We utilized data from the global network of neutron monitors (time definition of 5 minutes) and data from GOES 16 and 18 spacecraft. Differential rigidity spectra of solar cosmic rays were obtained, and the maximum rigidities of particle acceleration in these events were determined. We confirmed that the maximum rigidity of accelerated particles for both GLEs is below ~2–3 GV. We also demonstrate spatial distributions of 2-GV primary particles. Bidirectional anisotropy has been found, which gives evidence of the Earth's presence in a loop-like structure of the interplanetary magnetic field.

Keywords: cosmic rays, ground level enhancements.

ВВЕДЕНИЕ

Вспышки на Солнце характеризуются выделением огромного количества энергии, часть которой уходит на ускорение космических лучей (КЛ). Приход на орбиту Земли ускоренных вспышечными процессами частиц называется солнечным протонным событием (СПС). Обычно СПС регистрируются спутниковыми детекторами, но иногда солнечные протоны достигают достаточных энергий, чтобы вызвать возрастание интенсивности вторичных КЛ на поверхности Земли. Такое событие классифицируется как Ground Level Enhancement, или GLE. За всю историю наблюдений с 1942 г. по настоящее время было зарегистрировано всего 77 GLE [https://gle.oulu.fi].

В данной работе мы рассматриваем слабые GLE, наблюдавшиеся в максимуме 25-го солнечного цикла 8 июня и 21 ноября 2024 г. В базе данных GLE [https://gle.oulu.fi] события записаны под номерами 75 и 76 соответственно.

С физической точки зрения слабые GLE важны для понимания механизмов ускорения и разделения возможных вкладов от различных источников [Miroshnichenko, Yanke, 2016; Mishev et al., 2017]. Особое значение в этом вопросе имеет форма энергетического/жесткостного спектра ускоренных частиц.

Целью данной работы является получение спектров и анизотропии солнечных протонов в период исследуемых GLE, а также сравнение этих событий.

В таблице приведена основная информация об обстановке в межпланетном пространстве (вспышки, корональные выбросы массы (КВМ)) и максимальное возрастание КЛ на нейтронном мониторе (НМ).

Основные характеристики ассоциированных источников GLE и регистрация события на НМ «Южный Полюс» (SOPO)

GLE			Вспышка		КВМ
			Класс/Балл, координаты	Радиовсплеск II типа	*V*, км/с
№	Дата	Max, % SOPO			
75	08.06.2024	2.2	M9.7/1F 17° S, 53° W	+	гало 1427
76	21.11.2024	3.2	08° S, 133° W		гало 1436

1 – https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html

Согласно таблице, рассматриваемые GLE похожи по вспышечному источнику, скорости гало-КВМ, наличию радиовсплеска II типа, который является показателем способности КВМ генерировать сильную ударную волну из нижней части солнечной короны в межпланетную среду, что типично для событий GLE [Gopalswamy, 2011], при этом отмечаются небольшие амплитуды возрастания интенсивности КЛ. Отличие между событиями заключается в местоположении их источников. Вспышка, вызвавшая GLE75, произошла близко к силовой линии Солнце—Земля (долгота 53° W), что благоприятствует попаданию ускоренных частиц на Землю, а GLE76 было связано с залимбовой вспышкой, что затруднило прямой приход частиц на Землю.

ДАННЫЕ И МЕТОД

Для анализа были использованы 5-минутные данные мировой сети станций КЛ (для GLE75 — 33 НМ, для GLE76 — 29 НМ [https://www.nmdb.eu/, https://cr0.izmiran.ru]) и данные, полученные с космических аппаратов GOES-16, 18 [http://satdat.ngdc.noaa.gov./sem/goes].

Анализ выполнен методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [Dvornikov, Sdobnov, 1997; Ковалев и др. 2022]. В отличие от существующих методов исследования КЛ, например, [Вашенюк и др., 2009; Григорьев, Стародубцев, 2015; Mishev et al., 2018], 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 мезонные телескопы и т. д.) Данное обстоятельство дает возможность наряду с фазами первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии определять жесткостной спектр изотропной составляющей, а также получать информацию об ориентации межпланетного магнитного поля.

Дифференциальные жесткостные спектры КЛ рассчитаны в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [Дворников и др., 2013]. Выражение для дифференциального жесткостного спектра КЛ имеет вид

$$J(R) = C\frac{(\varepsilon^2 - \varepsilon_0^2)^{3/2}}{\varepsilon[(\varepsilon + \Delta\varepsilon)^2 - \varepsilon_0^2]}\left(\frac{\varepsilon + \Delta\varepsilon}{T_0 + \varepsilon_0}\right)^{-\gamma}, \quad (1)$$

где ε — полная энергия частиц с жесткостью R, ε_0 — энергия покоя, T_0 — кинетическая энергия, при которой интенсивность КЛ соответствующей жесткости равна C, γ — спектральный индекс галактического спектра КЛ, Δε — изменение полной энергии частиц в электромагнитных полях гелиосферы.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Используя выражение (1) мы рассчитали дифференциальные жесткостные спектры протонов на орбите Земли в разные моменты GLE75 и 76. Считая, что спектр галактических КЛ слабо меняется за время события, мы оценили дифференциальный спектр ускоренных в окрестностях Солнца частиц путем вычитания из полученных дифференциальных жесткостных спектров в разные моменты события спектр первичных КЛ, усредненного за час, предшествовавший началу GLE. Полученные таким образом дифференциальные жесткостные спектры ускоренных частиц показаны на рис. 1. Видно, что предельная жесткость ускоренных в окрестностях Солнца частиц в рассмотренных событиях оценивается ~2–3 ГВ. При исследовании слабых GLE 23-го солнечного цикла — GLE56 (02.05.1998 г.) [Луковникова, Сдобнов, 2022] и GLE58 (24.08.1998 г.) [Kravtsova, Sdobnov, 2023] — также отмечается ускорение частиц ~3 ГВ.

Дифференциальные жесткостные спектры во время GLE75 (рис. 1, *б*) демонстрируют эффект обратной дисперсии — ранний приход частиц с меньшей энергией. В работе [Struminsky et al., 2025] такой эффект объяснен стохастическим механизмом ускорения частиц солнечными электрическими полями и различием во временах ускорения.

На рис. 2 показано пространственное распределение первичных КЛ с жесткостью 2 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат во время исследуемых GLE. Во всех случаях двунаправленная анизотропия КЛ свидетельствует о наличии на орбите Земли образований типа магнитной петли, силовые линии которой замкнуты на Солнце [Richardson et al., 2000].

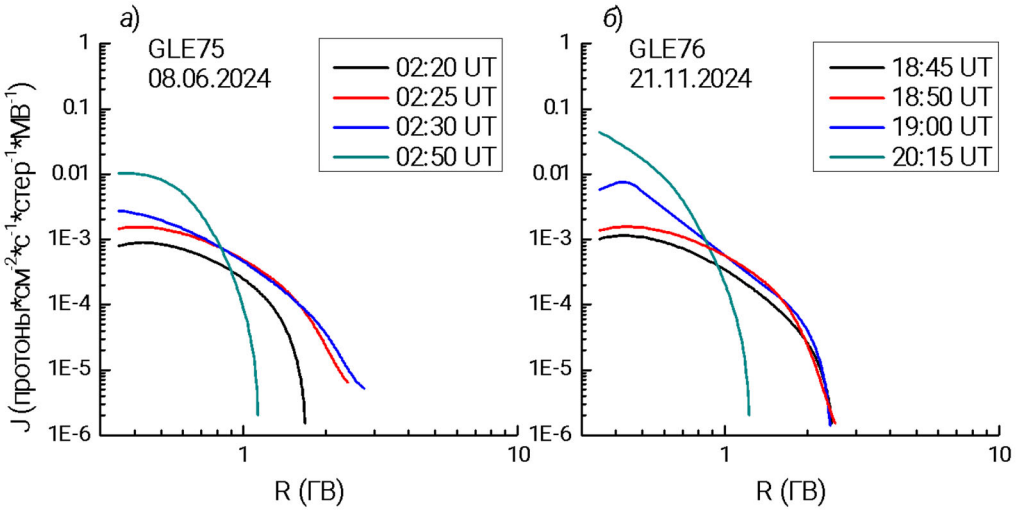

Рис. 1. Дифференциальные жесткостные спектры ускоренных в окрестностях Солнца частиц в разные моменты GLE75 (*а*) и GLE76 (*б*)

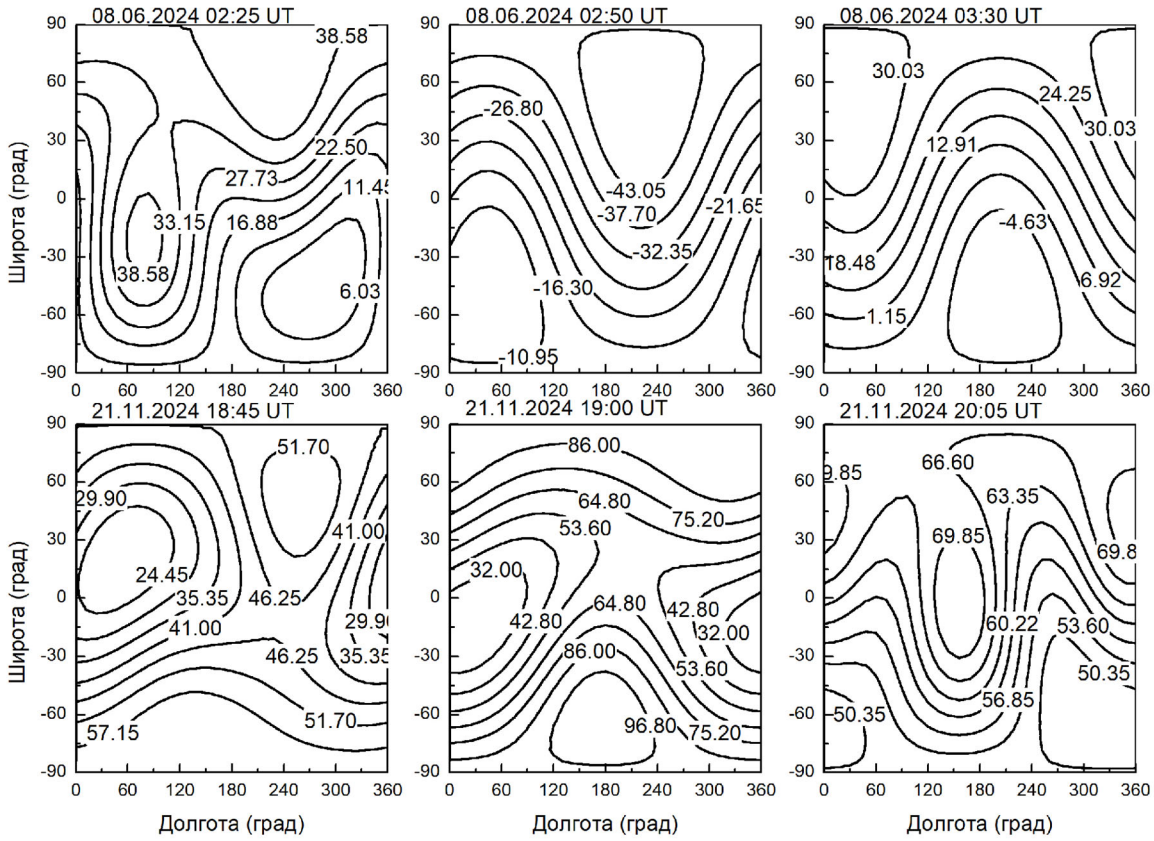

Рис. 2. Пространственное распределение частиц с жесткостью 2 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат в разные моменты GLE75 (вверху) и GLE76 (внизу)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании приведенных результатов можно сделать следующие выводы.

Дифференциальные жесткостные спектры ускоренных в окрестности Солнца частиц в периоды GLE75 и GLE76 подобны. Максимальная жесткость ускоренных протонов в обоих событиях оценена ~2–3 ГВ.

Для GLE75 обнаружен эффект обратной дисперсии, заключающийся в раннем приходе частиц с более низкой энергией, который может являться следствием ускорения частиц солнечными электрическими полями и различием во временах ускорения.

Показана динамика изменений в дифференциальных жесткостных спектрах ускоренных частиц в течение рассмотренных событий. Эта информация может помочь в выборе возможных механизмов ускорения СКЛ.

Наличие двунаправленной анизотропии в рассматриваемых событиях указывает на то, что Земля находилась в петлеобразных структурах ММП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» [http://ckp-rf.ru/ckp/3056/] и Уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» (Сеть СКЛ) [https://ckp-rf.ru/usu/433536/].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В. Релятивистские СКЛ в событиях 19-го солнечного цикла // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73, № 3. С. 318–320.

Григорьев В.Г., Стародубцев С.А. Метод глобальной съемки в режиме реального времени и прогноз космической погоды // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79, № 5. С. 703–707.

Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Диагностика электромагнитных характеристик межпланетной среды по эффектам в космических лучах // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53, №. 4. С. 457–468.

Луковникова А.А., Сдобнов В.Е. Питч-угловая анизотропия и дифференциальные жесткостные спектры космических лучей во время GLE 2 и 6 мая 1998 г. // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8, № 2. С. 29–33.

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Time variations of the cosmic ray distribution function during a solar event of September 29, 1989 // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, A11. P. 24209–24219.

Gopalswamy N. Planetary Radio Emissions VII (PRE VII). Vienna, Springer, 2011, 325 p.

Kovalev I.I., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. A proposal to extend the spectrographic global survey method // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2022. V. 235. P. 105887.

Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. Cosmic ray ground level enhancement on August 24, 1998 // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87, N 7. P. 1063–1065.

Mishev A., Poluianov S., Usoskin I. Assessment of spectral and angular characteristics of sub-GLE events using the global neutron monitor network // J. Space Weather and Space Climate. 2017. V. 7. A28.

Mishev A., Usoskin I., Raukunen O. et al. First analysis of ground-level enhancement (GLE) 72 on 10 September 2017: Spectral and anisotropy characteristics // Solar Phys. 2018. V. 293. P. 136.

Miroshnichenko L.I., Yanke V.G. Size distributions of solar proton events: methodological and physical restrictions // Solar Phys. 2016. V. 291. P. 3685–3704.

Richardson I.G., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Cane H.V. Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~1 MeV) en-

ergies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta // J. Geophys. Res. 2000. V. 105A. P. 12579–12591.

Struminsky A.B., Ozheredov V.A., Sadovskii A.M. et al. Evidence of prolonged acceleration of solar protons in average electric fields less than $4 \cdot 10^{-4}$ V/cm // Adv. Space Res. 2025. V. 7, Iss 12. P. 7564–7577.

URL: https://gle.oulu.fi (дата обращения 20.05.2026).

URL: https:// nmdb.eu/ (дата обращения 20.05.2026).

URL: https://cr0.izmiran.ru (дата обращения 20.05.2026).

URL: http://satdat.ngdc.noaa.gov./sem/goes (дата обращения 20.05.2026).

URL: https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI (дата обращения 20.05.2026).

URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html (дата обращения 20.05.2026).