

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ СЛАБЫХ GLE В МАЕ И АВГУСТЕ 1998 г.  
МЕТОДОМ СПЕКТРОГРАФИЧЕСКОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ СЪЕМКИ**

**И.И. Ковалев, М.В. Кравцова, С.В. Олемской, В.Е. Сдобнов**

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск, Россия,  
ivankov@iszf.irk.ru

**COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO WEAK GLEs IN MAY AND AUGUST 1998  
BY SPECTROGRAPHIC GLOBAL SURVEY METHOD**

**I.I. Kovalev, M.V. Kravtsova, S.V. Olemskoy, V.E. Sdobnov**

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

**Аннотация:** Методом спектрографической глобальной съемки проведен анализ двух слабых наземных возрастаний интенсивности космических лучей (КЛ): 2 мая (GLE56) и 24 августа (GLE58) 1998 г. Используются данные мировой сети станций нейтронных мониторов (5-минутные) и данные космических аппаратов GOES-9 и 10. 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 GLEs 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 повышения интенсивности

**Abstract:** Using a spectrographic global survey method, we carried out an analysis of two weak ground-level enhancements of cosmic rays: May 2 (GLE56) and August 24 (GLE58). We used data from the worldwide network of neutron monitors (time definition of 5 minutes) and data from GOES 9 and 10 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**

Солнечные протонные события (СПС) представляют собой протоны, ускоренные во вспышечных процессах на Солнце. Ускорение протонов может происходить до релятивистских энергий. Такие СПС приводят к наземным возрастаниям интенсивности космических лучей (КЛ) или в английской интерпретации к GLE (Ground Level Enhancement). GLE довольно редкие явления. За всю историю наблюдений с 1942 г. по настоящее время было зарегистрировано всего 73 события [https://gle.oulu.fi], но в [https://www.nmdb.eu] обсуждается возможное появление GLE74 (11 мая 2024 г.).

В данной работе мы рассматриваем два слабых GLE, произошедших 2 мая и 24 августа 1998 г., входящих в число GLEs, которыми был богат 23-ий солнечный цикл (16 событий). В базе данных GLE

[https://gle.oulu.fi] события записаны под номерами 56 и 58. Следует отметить, то в 23-м солнечном цикле можно выделить еще два небольших события: GLE57 (6 мая 1998 г.) [Луковникова, Сдобнов, 2022] и GLE68 (17 января 2005 г.) [Gopalswamy et al., 2012].

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

В таблице 1 приведена основная информация об обстановке в межпланетном пространстве (вспышки, корональные выбросы массы (КВМ)) и максимальное возрастание КЛ на нейтронных мониторах (НМ).

Таблица 1.

Основные характеристики ассоциированных источников GLE и регистрация события на НМ

GLE			<sup>1</sup> Мах поток протонов, pfu (IMP, GOES)		Вспышка		КВМ V, км/с
№	Дата	Мах, % (НМ)	> 10 МэВ	> 700 МэВ	Класс/Балл	Радиовсплеск	
			56	02.05.1998			7 (Оулу)
58	24.08.1998	4 (Мыс Шмидта)	200	5.1	X1.0/3B	II–IV	<sup>2</sup> 1420

1 – [Белов и др., 2010], 2 – [Gopalswamy et al, 2012]

Согласно данным таблицы 1 исследуемые GLE качественно похожи друг на друга: источник события находился в области Солнца, не связанной с Землей спиралью Паркера, подобно, как и GLE64 (24 августа 2002 г.) [Kovalev et al., 2024]; сходство по энергетике (вспышка X1.0/3B, быстрый KBM, сильное радиоизлучение) и наблюдается небольшая амплитуда возрастания интенсивности КЛ с максимумом на высокоширотных НМ.

В работах [Луковникова, Сдобнов, 2022; Kravtsova, Sdobnov, 2023] выполнен анализ этих GLEs по данным мировой сети станций КЛ с часовым разрешением (39 НМ). Интересно было посмотреть, совпадут ли результаты анализа при использовании 5-минутных данных, когда количество НМ много меньше: для GLE56 5-минутные данные доступны с 20 НМ, для GLE58 — лишь с 16 НМ [https://www.nmdb.eu/, https://cr0.izmiran.ru]. Данные по измерениям протонов на орбите Земли, полученные с космических аппаратов (GOES-9 и 10) взяты с сайта [http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes]. Амплитуды модуляций отсчитывались от средней скорости счета за час, предшествующий началу события.

Анализ выполнен методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [Dvornikov, Sdobnov, 1997; Kovalev et al., 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, анизотропии, получать информацию об ориентации межпланетного магнитного поля.

Целью данной работы является сравнение спектров и анизотропии ускоренных солнечных КЛ двух GLE с близкими начальными условиями на Солнце с использованием 5-минутных данных наблюдений КЛ на мировой сети станций НМ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Используя выражение для жесткостного спектра КЛ, полученного в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [Дворников и др., 2013] мы рассчитаны дифференциальные жесткостные спектры протонов на орбите Земли в разные моменты GLE56 и GLE58. 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, предшествующий началу GLE. Полученные таким образом дифференциальные жесткостные спектры ускоренных частиц приведены на рис. 1.

Для обоих событий можно отметить предельную жесткость ускоренных в окрестностях Солнца частиц около 2–3 ГВ. Это согласуется с оценками, полученными в работах [Stoker, 2002; Луковникова, Сдобнов, 2022; Kravtsova, Sdobnov, 2023].

На рис. 2 приведено пространственное распределение первичных КЛ с жесткостью 2 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат во время исследуемых GLEs. Для GLE56 наблюдается чередование двунаправленной и однонаправленной анизотропии КЛ. Наличие двунаправленной анизотропии КЛ в период GLE56 отмечалось в работе [Белов и др., 2000; Данилова и др., 2002; Луковникова, Сдобнов, 2022]. Направления повышенного потока частиц в 14:15 UT согласуются с направлениями анизотропии, полученными в 14:00 UT по часовым данным [Луковникова, Сдобнов, 2022].

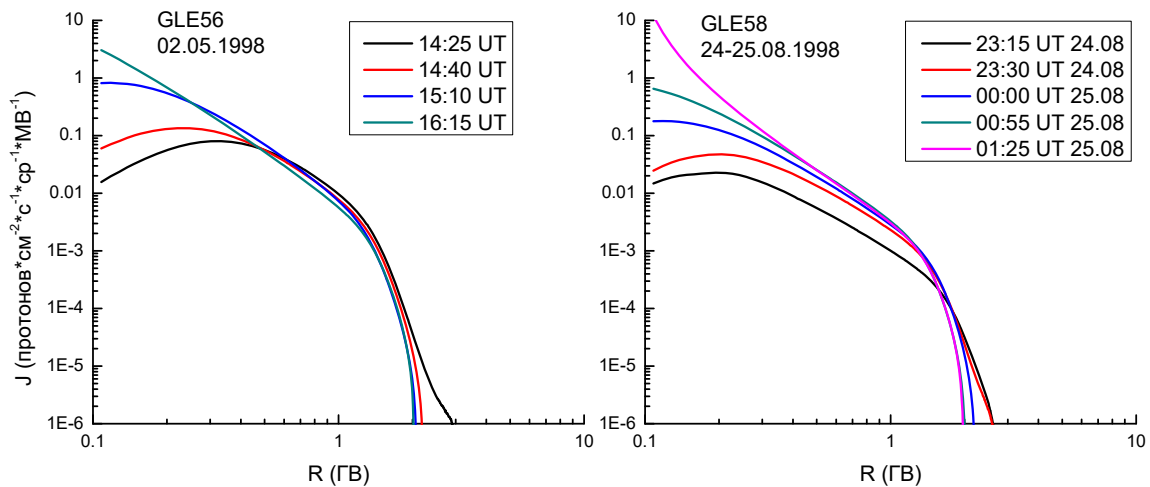


Рис. 1. Дифференциальные жесткостные спектры ускоренных в окрестностях Солнца частиц в разные моменты GLE56 (слева) и GLE58 (справа)

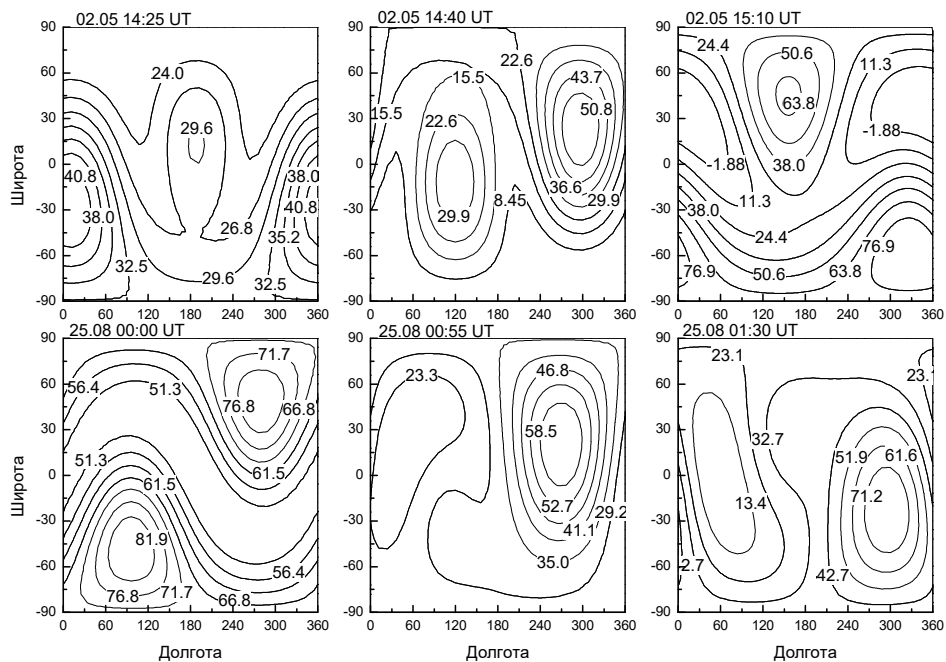


Рис. 2. Пространственное распределение частиц с жесткостью 2 ГВ в разные моменты GLE56 (верхний ряд) и GLE58 (нижний ряд)

Для GLE58 установлено, что двунаправленная анизотропия в начале события переходит в однонаправленную в районе 00:00 UT 25 августа 1998 г. В работе [Kravtsova, Sdobnov, 2023] обнаружена только однонаправленная анизотропия в 00:00 UT 25 августа 1998 г., что согласуется с полученными нами результатами для 00:55 UT. В обоих случаях двунаправленная анизотропия КЛ свидетельствует о наличии на орбите Земли образований типа «магнитная петля» [Richardson et al., 2000].

## ВЫВОДЫ

На основании приведенных результатов можно заключить:

- Рассчитаны дифференциальные жесткостные спектры ускоренных в окрестности Солнца частиц в периоды GLE56 и GLE58;
- Показана динамика изменений в дифференциальных жесткостных спектрах ускоренных частиц в течение рассмотренных событий. Эта информация может помочь в выборе возможных механизмов ускорения СКЛ;
- Установлено, что дифференциальные жесткостные спектры ускоренных частиц в событиях GLE56 и GLE58 подобны. Максимальная жесткость ускоренных протонов не превышает  $\sim 2\text{--}3$  ГВ;
- Поведение питч-угловой анизотропии в периоды GLE56 и GLE58 различается, что зависит от конкретных условий межпланетной среды;
- При рассмотрении GLE58 по 5-минутным данным выявлена двунаправленная анизотропия, которая не была обнаружена при расчетах по часовым данным НМ;
- Наличие двунаправленной анизотропии в событиях GLE56 и GLE58 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

- Белов А.В., Вашенюк Э.В., Ерошенко Е.А., Пчелкин В.В. Возрастание космических лучей и структура возмущений солнечного ветра 2 мая 1998 г. // *Астроном. вестник*. 2000. Т. 34, № 2. С. 169–172.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Крякунова О.Н. и др. Наземные возрастания солнечных космических лучей в последних трех циклах солнечной активности // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2010. Т. 50, № 1. С. 23–36.
- 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.
- Данилова О.А., Тясто М.И., Вашенюк Э.В. и др. Отклик магнитосферы на наземное возрастание СКЛ 2 мая 1998 г. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2002. Т. 42, № 1. С. 32–35.
- 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., Xie H., Yashiro S. et al. Properties of ground level enhancement events and the associated solar eruptions during solar cycle 23 // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 171. P. 23–60.

- Kovalev I.I., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. A proposal to extend the spectrographic global survey method // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2022. V. 235. P. 105887.
- Kovalev I.I., Kravtsova M.V., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. Spectra and Anisotropy of Cosmic Rays during GLE64 // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2024. V. 64, N. 1. P. 44-48.
- 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., 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.
- 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.
- 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) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105A. P. 12579–12591.
- Stoker P.H. Proton ground-level enhancements of the 23rd solar cycle // *South Afr. J. Sci.* 2002. V. 98, N 5. P. 289–292.
- URL: <https://gle oulu.fi> (дата обращения 20.05.2024).
- URL: <https://www.nmdb.eu/> (дата обращения 20.05.2024).
- URL: <https://cr0.izmiran.ru> (дата обращения 20.05.2024).
- URL: <http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes> (дата обращения 20.05.2024).
- URL: <https://ckp-rf.ru/usu/433536/>