

**ПИТЧ-УГЛОВАЯ АНИЗОТРОПИЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ЖЕСТКОСТНЫЕ СПЕКТРЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ GLE 2 И 6 МАЯ 1998 г.****PITCH-ANGLE ANISOTROPY AND DIFFERENTIAL RIGIDITY SPECTRA OF COSMIC RAYS DURING GLE ON MAY 2 AND 6, 1998****А.А. Луковникова** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, luk@iszf.irk.ru***В.Е. Сдобнов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, sdobnov@iszf.irk.ru***A.A. Lukovnikova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, luk@iszf.irk.ru***V.E. Sdobnov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, sdobnov@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Исследованы питч-угловая анизотропия и дифференциальные жесткостные спектры космических лучей во время наземных возрастаний 2 и 6 мая 1998 г. методом спектрографической глобальной съемки на основе данных наземных измерений космических лучей на мировой сети станций нейтронных мониторов (39 нейтронных мониторов). Получены дифференциальные жесткостные спектры солнечных космических лучей в исследуемые периоды. Определены максимальные жесткости, до которых произошло ускорение протонов в этих событиях. Максимальная жесткость ускоренных частиц во время наземного возрастания 2 мая составила ~2.4, 6 мая — ~1.8 ГВ. Обнаруженная двунаправленная анизотропия свидетельствует о нахождении Земли в петлеобразной структуре ММП типа магнитной ловушки и в первом, и во втором событиях.

**Ключевые слова:** космические лучи, наземное возрастание, анизотропия, жесткостной спектр.

**Abstract.** Using data from the worldwide network of neutron monitors (39 stations) and the method of global spectrographic survey, we have studied pitch-angle anisotropy and differential rigidity spectra of cosmic rays during the ground level enhancements on May 2 and 6, 1998. We obtained differential rigidity spectra of solar cosmic rays in these events and determined the maximum rigidities to which protons accelerated. The maximum rigidities of accelerated protons during the ground level enhancements on May 2 was ~2.4; on May 6, ~1.8 GV. The revealed bidirectional pitch-angle anisotropy indicates that Earth was in the IMF loop structure during these events.

**Keywords:** cosmic rays, ground level enhancement, anisotropy, rigidity spectrum.

**ВВЕДЕНИЕ**

Солнечные космические лучи (СКЛ) — поток заряженных частиц, ускоряемых до высоких энергий в верхней атмосфере Солнца во время солнечных вспышек. СКЛ регистрируются у Земли в виде внезапных резких повышений интенсивности КЛ. Возрастания потоков солнечных протонных событий (СПС) с энергией протонов выше 500 МэВ, которые регистрируются на Земле, называют наземными возрастаниями СКЛ, или Ground Level Enhancements (GLE).

Несмотря на то, что количество GLE составляет всего ~5 % СПС, исследования наземных возрастаний посвящено множество публикаций [Smart, Shea, 1991; Cliver, 2006]. Начало отсчета номеров GLE ведется с 28 февраля 1942 г. (GLE № 1) с момента регистрации их ионизационными камерами [Smart, Shea, 1991]. На данный момент зарегистрировано [<http://gle oulu.fi>; <http://nmdb.eu/nest>] 73 события. GLE происходят в периоды локальных кратковременных максимумов солнечных пятен и служат проявлением больших всплесков солнечной активности (СА) [Cliver, 2006; Белов и др., 2010]. Исследования GLE

важны для выяснения механизмов ускорения и распространения заряженных частиц на Солнце и в межпланетной среде, обеспечения радиационной безопасности при полетах космических аппаратов, предотвращения крупных аварий на электростанциях и т. д.

Наиболее значимые спорадические изменения интенсивности КЛ связаны с вспышками и корональными выбросами массы (КВМ) [Reames, 1999; Miroshnichenko, Perez-Peraza, 2008], за которыми следуют изменения в параметрах межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ). Чаще всего события GLE происходят на фазе максимума и спада СА [Shea, Smart, 1990]. Согласно [Базилевская и др., 2004; Belov et al., 2005], чаще всего ускоренные частицы связаны со вспышками, имеющими рентгеновский класс >M5, но не каждая большая вспышка сопровождается потоком релятивистских протонов.

По информации международной базы данных GLE [<http://gle oulu.fi>] в 23-м цикле СА было зарегистрировано 16 GLE.

Май 1998 г. относится к фазе роста 23-го цикла СА и характеризуется целым рядом событий в КЛ. В течение месяца на Солнце наблюдалось несколько

активных областей, но наиболее значимые события связаны с активной областью (АО) 8210, в которой за период апрель–май 1998 г. были зарегистрированы 4 вспышки X-класса, 5 — M-класса и 22 — C-класса. В это время произошло 16 форбуш-эффектов (ФЭ) [<http://spaceweather.izmiran.ru/rus/fds1998.html>] и 2 GLE [<http://gle.oulu.fi>; <http://nmdb.eu/nest>; Usoskin et al., 2015].

Различные аспекты событий 2 и 6 мая в КЛ исследованы в работах [Danilova et al., 1999; Белов и др., 2000; Richardson et al., 2000; Петухов и др., 2003; Логачев и др., 2015; Thakur et al., 2016; Kocharov et al., 2017]. В данной работе по наземным измерениям на мировой сети станций КЛ методом спектрографической глобальной съемки (СГС) получены дифференциальные жесткостные спектры и питч-угловая анизотропия КЛ для GLE 2 и 6 мая, источником которых была одна и та же АО. Новизна работы заключается в том, что при исследовании GLE 2 и 6 мая методом СГС определены максимальные жесткости, до которых произошло ускорение частиц, и найдено, что 6 мая Земля находилась в петлеобразной структуре ММП.

## ОБСТАНОВКА В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В МАЕ 1998 г.

Источником вспышек на Солнце, связанных с GLE 2 и 6 мая (GLE56 и GLE57), стала АО 8210: 2 мая в этой области произошла вспышка балла X1.1/3B (координаты S15W15, начало 13:31, максимум 13:42, окончание 13:51 UT, максимальный поток протонов (IMP, GOES) с энергией >10 МэВ равен 150 pfu, >100 МэВ — 9.2 pfu). KBM произошел в 14:06 UT, его скорость составляла  $V=938$  км/с [<https://www.solarmonitor.org>; <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>; [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/UNIVERSAL/1998\\_05/univ1998\\_05.html](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/1998_05/univ1998_05.html)].

В той же АО 8210 6 мая наблюдалась вспышка балла X2.7/1N (координаты S11W65, начало 07:58, максимум 08:09, окончание 08:20 UT, максимальный поток протонов (IMP, GOES) с энергией >10 МэВ равен 210 pfu, >100 МэВ — 5.4 pfu). KBM был зафиксирован в 08:29 UT,  $V=1099$  км/с [<https://www.solarmonitor.org>; <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>; [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/UNIVERSAL/1998\\_05/univ1998\\_05.html](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/1998_05/univ1998_05.html)].

Во время GLE 2 мая наблюдались следующие параметры ММП: модуль ММП ~14 нТл, скорость СВ ~600 км/с, температура протонов СВ ~ $0.1 \cdot 10^6$  К, плотность ~5 частиц/см<sup>3</sup>. В 09:00 UT 6 мая были зарегистрированы следующие параметры СВ: модуль ММП ~8 нТл, скорость СВ ~500 км/с, температура ~ $0.1 \cdot 10^6$  К и плотность протонов СВ ~0.5 частиц/см<sup>3</sup>.

$K_p$ -индекс 2 мая возрастал до 7, а 6 мая не превышал значения 5 [<https://www.spaceweatherlive.com/rhiv/1998/05/02/kp.html>].

В работе [Петухов и др., 2003] указано, что во время события 2 мая крупномасштабные магнитные облака от предшествующих возмущений, пересекавшие орбиту Земли, обусловили локальные вариации интенсивности СКЛ малых энергий. В [Белов и

др., 2000] отмечаются существенное отклонение ММП от спирального направления, двунаправленная анизотропия в распределении КЛ, сложная картина GLE как результат попадания Земли в KBM, обусловленный предшествующей активностью на Солнце.

GLE56 наблюдалось на фоне ФЭ, начавшегося 1 мая в 21:56 UT. ФЭ был связан с приходом к Земле магнитного облака, в котором она находилась вплоть до прихода возмущения от вспышки 2 мая, которая стала источником релятивистских солнечных протонов (РСП) [Белов и др., 2000]. Максимальное возрастание зарегистрировано на станции КЛ Оулу в 14:05–14:10 UT и в пятиминутных данных достигало ~7 % [Белов и др., 2010].

GLE57 наблюдалось на фоне межпланетных возмущений, которые начались 1 мая. Максимальное возрастание на нейтронных мониторах наблюдалось 6 мая в 09:30–09:35 UT на станции КЛ Оулу и по данным пятиминутных наблюдений составляло ~4 % [Белов и др., 2010]. В работе [Логачев и др., 2015] указано, что 6 мая наблюдался минимальный поток протонов с энергией >1000 МэВ среди всех GLE 23-го цикла СА. Во время GLE 6 мая в измерениях спутника GOES не было зарегистрировано увеличения потока протонов с энергией >700 МэВ (жесткость ~1.3 ГВ) [Kühl et al., 2017]. Согласно [Thakur et al., 2016], имеется связь между GLE в 23–24-м циклах СА и увеличением интенсивности в спутниковых наблюдениях GOES. Отсутствие увеличения потока протонов с энергией >700 МэВ по данным GOES-08, 09 во время GLE57 является исключением среди всех GLE 23-го и 24-го циклов СА [Thakur et al., 2016].

В работах [Danilova et al., 1999; Данилова и др., 2002] отмечалось, что в момент GLE56 наблюдалась двунаправленная анизотропия солнечных протонов, что было следствием попадания Земли в KBM. ММП внутри KBM часто имеет петлеобразную структуру, в которой наблюдается двунаправленная анизотропия.

В работе [Белов и др., 2000] указано, что 2 мая Земля находилась внутри KBM в форме петлеобразной структуры, оба конца которой имеют начало на Солнце. При попадании Земли в данную структуру и наблюдается двунаправленная анизотропия.

В [Stoker, 2002] найдено, что ускоренных протонов с жесткостью выше 4 ГВ в событии 2 мая не наблюдалось.

## ДАнные И МЕТОД

Анализ событий GLE56 и GLE57 проводился методом СГС [Dvornikov, Sdobnov, 1998] по данным мировой сети станций нейтронных мониторов (39 нейтронных мониторов) [<ftp://cr0.irmiran.rssi.ru>], исправленным за давление и усредненным за часовые интервалы. Данные по измерениям протонов на орбите Земли, полученные GOES-9, взяты с сайта [<http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes>].

Метод СГС позволяет разделять вариации КЛ межпланетного и магнитосферного происхождения. Для расчетов комплекс наземной регистрирующей аппаратуры (мировая сеть нейтронных мониторов, расположенных на разных уровнях в атмосфере

Земли) используется как единый многоканальный прибор, сканирующий небесную сферу и собирающий информацию от каждой станции в определенном асимптотическом конусе. По сравнению с отдельными станциями КЛ за счет многоканальности комплекса обеспечивается надежность и непрерывность измерений, высокая статистическая точность и минимизация аппаратных вариаций. Это позволяет рассчитывать фазы первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии, определять вариации жесткостных спектров изотропной составляющей и анизотропии, а также получать информацию об ориентации ММП по фазе питч-угловой анизотропии. Кроме того, используя данные наблюдений интенсивности КЛ на средне- и низкоширотных станциях, с помощью метода СГС можно определять вариации планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания (ЖГО) за каждый час наблюдений. Среднеквадратические ошибки решения с учетом статистических ошибок в данных наблюдений станций КЛ мировой сети, а также ошибок, вносимых моделью, в среднем составляют  $\sim 0.4\text{--}0.5\%$ , в определении методом СГС амплитуд вариаций жесткостного спектра и амплитуд питч-угловой анизотропии КЛ —  $\sim 1\text{--}2\%$ , изменений планетарной системы ЖГО —  $\sim 0.05\text{--}0.07$  ГВ [Кравцова, Сдобнов, 2019].

Амплитуды модуляции КЛ отсчитывались от фонового уровня 30 апреля 1998 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 *a, б* приведены расчетные амплитуды первой  $A_1$  и второй  $A_2$  сферических гармоник питч-угловой анизотропии КЛ для частиц с  $R=4$  ГВ с 1 по 6 мая. Представлены также изменения жесткости геомагнитного обрезания  $\Delta R$  в пункте с пороговой жесткостью  $R=4$  ГВ совместно с  $Dst$ -индексом (панель *в*). Второго мая наблюдалось увеличение первой гармоники питч-угловой анизотропии до  $\sim 35\%$ , 6 мая — до  $\sim 25\%$  (панель *a*). Второго мая в 14:00 и 6 мая в 09:00 UT обнаружено увеличение амплитуды второй гармоники питч-угловой анизотропии до  $\sim 11$  и  $\sim 6\%$  соответственно (панель *б*). Событие 2 мая произошло во время ФЭ, который начался 1 мая в 21:56 UT на фоне геомагнитного возмущения ( $Dst \sim -80$  нТл). Изменения ЖГО в Иркутске составило от  $\sim -0.16$  до  $\sim 0.20$  ГВ (панель *в*). Событие 6 мая произошло на фазе восстановления ФЭ, начавшегося 4 мая в 02:15 UT, и геомагнитной бури ( $Dst \sim -70$  нТл). В этот период изменение ЖГО в Иркутске составило от  $\sim -0.17$  до  $\sim 0.20$  ГВ (панель *в*).

На рис. 2 изолиниями показаны относительные изменения интенсивности КЛ (без разделения на ГКЛ и СКЛ) с жесткостью  $R=4$  ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для моментов максимального наземного возрастания 2 и 6 мая.

Видно сложное угловое распределение интенсивности КЛ с жесткостью 4 ГВ по направлениям прихода частиц. Так, 2 мая повышенный поток частиц с жесткостью 4 ГВ наблюдался в 14:00 UT из направлений  $\sim 20^\circ$ ,  $\sim -30^\circ$  и  $\sim 180^\circ$ ,  $\sim 30^\circ$  (панель *a*). Полученные результаты по питч-угловой анизотро-

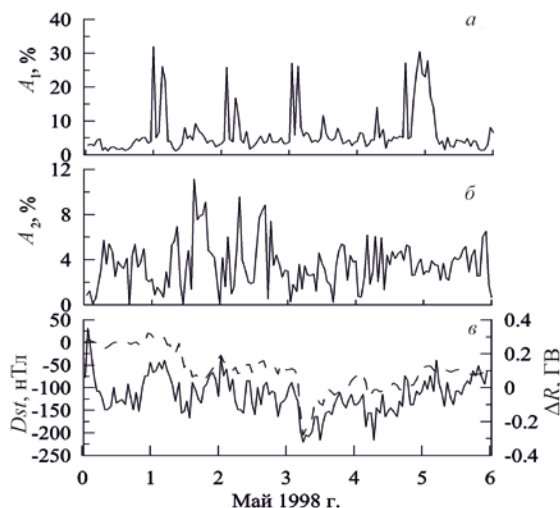


Рис. 1. Амплитуды первой  $A_1$  и второй  $A_2$  гармоник питч-углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ (*a, б*);  $Dst$ -индекс (сплошная линия, левая шкала) и изменения жесткости геомагнитного обрезания  $\Delta R$  для  $R=4$  ГВ (штриховая линия, правая шкала) (*в*)

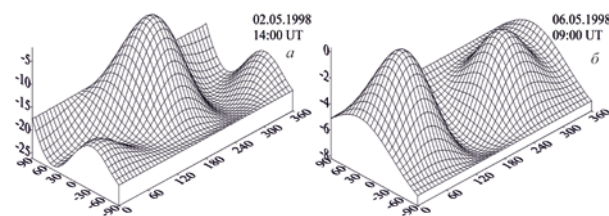


Рис. 2. Относительные изменения интенсивности КЛ с  $R=4$  ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат 2 мая в 14:00 (*a*) и 6 мая в 09:00 UT (*б*). Ось абсцисс — значения долготного угла  $\psi$ , ось ординат — широтный угол  $\lambda$ , ось Z — амплитуда вариаций интенсивности частиц в процентах к фоновому уровню

пии КЛ согласуются с результатами работы [Белов и др., 2000].

Двунаправленная анизотропия с повышенной интенсивностью наблюдалась 6 мая в 09:00 UT из направлений  $\sim 70^\circ$ ,  $\sim 15^\circ$  и  $\sim 265^\circ$ ,  $\sim 0^\circ$  (панель *б*).

Возрастание амплитуды второй гармоники питч-угловой анизотропии  $A_2$  свидетельствует о том, что во время описываемых событий Земля находилась внутри петлеобразной структуры ММП [Richardson et al., 2000].

В работах [Danilova et al., 1999; Белов и др., 2000; Данилова и др., 2002], посвященных исследованию GLE56, также обнаружена двунаправленная анизотропия и сделан вывод о наличии петлеобразной структуры ММП, к которой находилась Земля в тот период.

На рис. 3 показаны дифференциальные жесткостные спектры КЛ за 2 и 6 мая совместно с данными GOES-9: кривые 1 — перед событием, кривые 2 — во время события. Спектры были рассчитаны в рамках модели модуляции КЛ регулярными полями гелиосферы [Dvornikov, Sdobnov, 2002] по данным GOES-9 (до 1 ГВ) и по результатам наших расчетов с использованием данных мировой сети станций КЛ в высокоэнергичной области.

Дифференциальные спектры КЛ в моменты наземных возрастаний скорости счета детекторов мировой сети станций 2 и 6 мая включают и ГКЛ, и СКЛ, т. е.

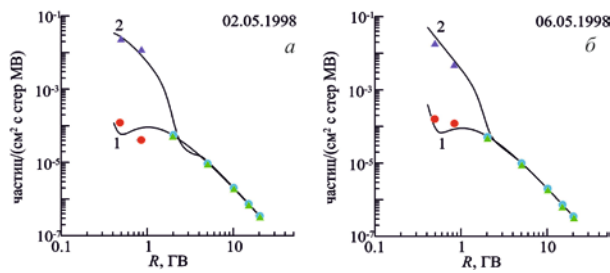


Рис. 3. Дифференциальные жесткостные спектры первичных КЛ в отдельные моменты времени GLE 2 и 6 мая (а, б). Кривые 1 — перед событием, красные кружки (< 1 ГВ) — данные GOES-9, синие кружки (> 1 ГВ) — результаты расчетов по СГС; кривые 2 — во время события, фиолетовые треугольники (< 1 ГВ) — данные GOES-9, зеленые треугольники (> 1 ГВ) — результаты расчетов по СГС

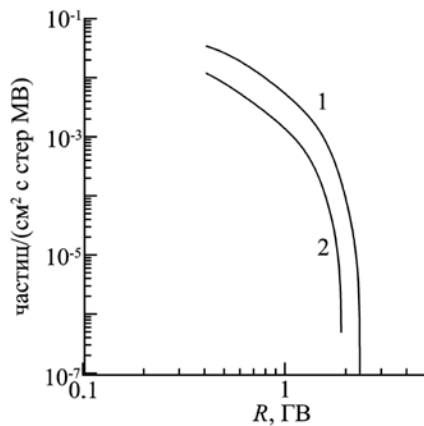


Рис. 4. Дифференциальные жесткостные спектры солнечных КЛ в границе атмосферы Земли во время GLE56 (кривая 1) и GLE57 (кривая 2)

частицы, ускоренные в окрестности Солнца. Поскольку данные события произошли в период ФЭ на фазе восстановления, для получения дифференциальных спектров только СКЛ 2 и 6 мая мы вычли дифференциальные спектры КЛ перед GLE из дифференциальных спектров КЛ в моменты максимальных амплитуд GLE. При этом предполагалось, что спектры ГКЛ существенно не меняются к моменту GLE, а ускорение частиц происходит до значений, при которых разность спектров в момент максимума GLE и перед ним становится нулевой (отрицательной).

На рис. 4 показаны дифференциальные жесткостные спектры СКЛ в моменты максимума (кривая 1) и GLE57 (кривая 2).

Результаты расчетов показали, что ускорение протонов во время GLE56 произошло до жесткости ~2.4 ГВ, а во время GLE57 — до жесткости ~1.8 ГВ. Полученные результаты не противоречат выводу [Stoker, 2002] о том, что во время GLE56 не наблюдалось ускоренных протонов с жесткостью выше 4 ГВ.

Несмотря на то, что источником GLE 2, и 6 мая послужила одна и та же АО, существуют различия между событиями. Различные по интенсивности рентгеновские вспышки вызвали различные максимальные наземные возрастания: 2 мая по данным станции КЛ Оулу амплитуда возрастания в 5-минутных значениях была в ~1.8 раз больше, чем 6 мая. Частицы в первом обсуждаемом событии ускорились до больших жесткостей (~2.4 ГВ), чем во втором (~1.8 ГВ). Наличие двунаправленной анизотропии (амплитуды

второй гармоники пичч-угловой анизотропии  $A_2$ ) свидетельствует о том, что и в том, и в другом событиях Земля в эти моменты находилась в петлеобразной структуре ММП типа магнитной ловушки.

## ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало следующие результаты.

1. Получены дифференциальные жесткостные спектры СКЛ в периоды GLE 2 и 6 мая 1998 г.

2. Определены максимальные жесткости, до которых произошло ускорение частиц в исследуемых событиях. Максимальная жесткость ускоренных протонов во время GLE 2 мая составила ~2.4 ГВ, а во время GLE 6 мая — ~1.8 ГВ.

3. Во время GLE56 и GLE57 была обнаружена двунаправленная анизотропия в направлениях ~20°, -30° и ~180°, ~30° в 14:00 UT 2 мая и в направлениях ~70°, ~15° и ~260°, ~0° в 09:00 UT 6 мая, что указывает на нахождение Земли в петлеобразной структуре ММП в эти периоды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены на оборудовании Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>] и Уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)» [[http://cr.izmiran.ru/dbs\\_unu.html](http://cr.izmiran.ru/dbs_unu.html)].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевская Г.А., Свиржевская А.К., Сладкова А.И. Связь между солнечными протонными событиями и рентгеновскими всплесками разных баллов на Солнце. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2004. Т. 44, № 4. С. 442–448.
- Белов А.В., Вашенюк Э.В., Ерошенко Е.А., Пчелкин В.В. Возрастание космических лучей и структура возмущений солнечного ветра 2 мая 1998 г. *Астрономический 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 аэронавигация*. 2010. Т. 50, № 1. С. 23–36.
- Данилова О.А., Тясто М.И., Вашенюк Э.В. и др. Отклик магнитосферы на наземное возрастание СКЛ 2 мая 1998 г. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2002. Т. 42, № 1. С. 32–35.
- Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Космические лучи в период геомагнитного возмущения в январе 2015 г. *Космические исследования*. 2019. Т. 57, № 1. С. 17–20. DOI: [10.1134/S0023420619010059](https://doi.org/10.1134/S0023420619010059).
- Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В. и др. Сравнение протонной активности в 20–23 солнечных циклах. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2015. Т. 55, № 3. С. 291–301. DOI: [10.7868/S001679401503013X](https://doi.org/10.7868/S001679401503013X).
- Петухов И.С., Петухов С.И., Стародубцев С.А., Тимофеев В.Е. Диффузионное распространение быстрых частиц в присутствии движущейся ударной волны. *Письма в астрономический журнал*. 2003. Т. 29, № 10. С. 742–751.
- Belov A., Garcia H., Kurt V., et al. Proton enhancements and their relation to the X-ray flares during the three last solar cycles. *Solar Phys.* 2005. Vol. 229. P. 135–159. DOI: [10.1007/s11207-005-4721-3](https://doi.org/10.1007/s11207-005-4721-3).
- Cliver E.W. The Unusual Relativistic Solar Proton Events of 1979 August 21 and 1981 May 10. *Astrophys. J.* 2006. Vol. 639, no. 2. P. 1206–1217. DOI: [10.1086/499765](https://doi.org/10.1086/499765).
- Danilova O.A., Tyasto M.I., Vashenyuk E.V., et al. The GLE of May 2, 1998: an effect of disturbed magnetosphere on

solar cosmic rays. *Proc. 26<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf. Salt Lake City, USA, 1999*. Vol. 6. P. 399–402.

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Analyzing the Solar Proton Event of 22 October 1989, Using the Method of Spectrographic Global Survey. *Solar Phys.* 1998. Vol. 178. P. 405–422. DOI: [10.1023/A:1005069806374](https://doi.org/10.1023/A:1005069806374).

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy of cosmic rays at the period of Forbush-effect on 12–15 July. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2002. Vol. 3, no.3. P. 217–226.

Kocharov L., Pohjolainen S., Mishev A., et al. Investigating the origins of two extreme solar particle events: proton source profile and associated electromagnetic emissions. *Astrophys. J.* 2017. Vol. 839, no. 2. P. 79. DOI: [10.3847/1538-4357/aa6a13](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6a13).

Kühl P., Dresing N., Heber B., Klassen A. Solar energetic particle events with protons above 500 MeV between 1995 and 2015 measured with SOHO/EPHIN. *Solar Phys.* 2017. Vol. 292, no. 10. DOI: [10.1007/s11207-016-1033-8](https://doi.org/10.1007/s11207-016-1033-8).

Miroshnichenko L.I., Perez-Peraza J.A. Astrophysical aspects in the studies of solar cosmic rays. *International Journal of Modern Physics A.* 2008. Vol. 23, no. 1. P. 1–141.

Reames D.V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Sci. Rev.* 1999. Vol. 90. P. 413–491. DOI: [10.1023/A:1005105831781](https://doi.org/10.1023/A:1005105831781).

Richardson I.G., Cane H.V., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (1 MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, no. A6. P. 12579–12591. DOI: [10.1029/1999ja000331](https://doi.org/10.1029/1999ja000331).

Shea M., Smart D. A summary of major solar proton events. *Solar Phys.* 1990. Vol. 127. P. 297–302. DOI: [10.1007/BF00152170](https://doi.org/10.1007/BF00152170).

Smart D., Shea M. A comparison of the magnitude of the 29 September 1989 high energy event with solar cycle 17, 18 and 19. *Proc. 22<sup>nd</sup> Int. Cosmic Ray Conf. Dublin, Ireland, 1991*. Vol. 3. P. 101–104.

Stoker P.H. Proton ground-level enhancements of the 23<sup>rd</sup> solar cycle. *South African Journal of Science.* 2002. Vol. 98, no. 5. P. 289–292.

Thakur N., Gopalswamy N., Mäkelä P., et al. Two Exceptions in the large SEP events of solar cycles 23 and 24. *Solar Phys.* 2016. Vol. 291. P. 513–530. DOI: [10.1007/s11207-015-0830-9](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0830-9).

Usoskin I., Ibragimov A., Shea M., Smart D. Database of ground level enhancements (GLE) of high energy solar proton events. *Proc. 34<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf. Den Haag, the Netherlands, 2015*. P. ID 054.

URL: <http://nmdb.eu/nest> (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: <http://gle oulu.fi> (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/fds1998.html> (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: <https://www.solarmonitor.org> (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/UNIVERSAL/1998\\_05/univ1998\\_05.html](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/1998_05/univ1998_05.html) (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: <https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv/1998/05/02/kp.html> (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: <ftp://cr0.irmiran.rssi.ru> (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: <http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes> (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: [http://cr.izmiran.ru/dbs\\_unu.html](http://cr.izmiran.ru/dbs_unu.html) (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

*Как цитировать эту статью:*

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. DOI: [10.12737/szf-82202204](https://doi.org/10.12737/szf-82202204).