

УДК 537.591.5

СОЛНЕЧНЫЕ РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭЛЕКТРОНЫ И ПРОТОНЫ 28 ОКТЯБРЯ 2021 ГОДА (GLE 73)

© 2023 г. А. Б. Струминский¹*, И. Ю. Григорьева², Ю. И. Логачев³, А. М. Садовский¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт космических исследований Российской академии наук”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Главная астрономическая обсерватория Российской академии наук”, Санкт-Петербург, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

*E-mail: astruminsky@gmail.com

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Рассматривается протонное событие 28 октября 2021 года, сопровождавшееся первым в текущем 25 цикле (73 в истории наблюдений) наземным возрастанием интенсивности космических лучей (GLE73). Период развития родительской вспышки с наибольшим энерговыделением длился более 10 мин, в процессе которого происходили: ускорение коронального выброса массы и, одновременно, ускорение заряженных частиц до релятивистских энергий. Подобие временных профилей интенсивности релятивистских электронов и протонов на орбите Земли, свидетельствует о стохастическом механизме их ускорения. Эруптивная вспышка X1.0 28 октября 2021 года в жестком рентгеновском излучении (>100 кэВ) по временным характеристикам подобна вспышке M5.1 17 мая 2012 г. с координатами N11W76 (GLE71). Относительно позднее начало возрастания потоков релятивистских электронов и протонов на орбите Земли в событии GLE73 по сравнению с событием GLE71 объясняется расположением вспышки 28 октября 2021 г. (S26W05) и вылетом коронального выброса массы в южном направлении.

DOI: 10.31857/S0367676523701818, EDN: OSLIHV

ВВЕДЕНИЕ

Анализ наблюдений солнечных релятивистских электронов и протонов в некоторых событиях 23 и 24 циклов активности позволил нам сделать вывод, что ускорение на ударных волнах корональных выбросов массы (КВМ) не является преобладающим механизмом набора энергии электронами и протонами [1, 2]. Этот вывод следовал из невозможности ускорения релятивистских электронов ударными волнами и наблюдающегося подобия временных профилей электронов >1 МэВ и протонов >100 МэВ. Солнечные электроны >1 МэВ и протоны >100 МэВ ускоряются стохастически в эруптивных вспышках длительностью >10 мин одновременно с ускорением КВМ [3].

Ниже мы применяем методы и подходы, развитые в [3–5], для исследования протонного события 28 октября 2021 г., которое сопровождалось первым в текущем 25 цикле солнечной активности наземным возрастанием (ground level

enhancement, GLE) интенсивности космических лучей и 73 GLE в истории их наблюдений [6].

Мы исследуем взаимосвязь солнечной вспышки X1.0 28 октября 2021 г. и сопровождающего ее КВМ. Показываем, как это было сделано в [3, 7] для события 17 мая 2012 г. (GLE 71), что наблюдения солнечных релятивистских протонов и электронов вблизи Земли не противоречат их ускорению во время наиболее эффективного вспышечного энерговыделения – ускорения КВМ. Далее мы сравниваем наблюдения этих двух протонных событий и делаем обобщающие выводы.

НАБЛЮДЕНИЯ 28 ОКТЯБРЯ 2021 ГОДА

Основные характеристики относительно нулевого времени приведены в табл. 1, данные взяты из файлов YYYYMMDDevents.txt [8]. Так как для события 28 октября 2021 г. в файле 20211028events.txt [8] нет информации об излучении на частотах >610 МГц, то за нуль времени выбрано начало радиоизлучения на частоте

Таблица 1. А — дата, нулевое время UT, балл и координаты вспышки, Б — начало, максимум и конец SXR вспышки (GOES); В — время $T_{\max}$ и $EM_{\max}$; Г — время первого появления КВМ (LASCO C2) и его средняя скорость, момент второго кадра и скорость КВМ (1, 2), измеренный позиционный угол (MPA); Д — начало, максимум и конец радиоизлучения на 245 МГц (RSTN); Е — момент, величина максимума (1 СЕП = 10^{-22} Вт/м²Гц) и конец излучения на 15.4 ГГц (RSTN); Ж — начало радио всплесков III, II и IV типов; З — начало отклика ACS SPI на солнечные протоны и начало GLE

А	Б, мин	В, мин	Г, мин, км/с, мин, км/с, град	Д, мин	Е, мин, СЕП, мин	Ж, мин	З, мин
17.05.2012	−5	+10	+18, 1582	−1	+6	+3	+10
01:30 M5.1	+17	+22	+30, 1757	+12	300	+1	+13
N07W28	+44		268	+28	+14	+2	
28.10.2021	−10	+3.5	+21, 1520	0	—	+2	+20
15:27 X1.0	+8	+9.5	+33, 1934	+2		+2	+18 ± 6 [12]
S26W05	+21		190	+25		+5	

610 МГц, а не 15.4 ГГц, как было принято в [1–3]. Температура T и мера эмиссии EM вспышечной плазмы, излучающей мягкий рентген (SXR), рассчитывались по данным наблюдений GOES в двух SXR каналах. Была использована стандартная процедура SolarSoft.

Информация о КВМ взята из каталога SOHO/LASCO [9]. В табл. 1 приведены времена первого и второго кадра КВМ — t_1 и t_2 , его средняя скорость $V_{\text{ср}}$ и скорость распространения от первого до второго зарегистрированного положения V_{12} (скорость первого появления). Направление распространения КВМ в каталоге характеризуется позиционным углом (PA — Position Angle), который измеряется от направления на север против часовой стрелки ($\sim 270^\circ$ соответствует западной полусфере, экватору Солнца и плоскости эклиптики).

Антисовпадательная защита спектрометра на КА ИНТЕГРАЛ (Anti-Coincidence Shield of Spectrometer on INTEGRAL — ACS SPI) [10] регистрирует жесткое рентгеновское излучение (HXR) > 100 кэВ и протоны > 100 МэВ. Мы используем эффективный, но не калиброванный детектор ACS SPI для исследования взаимосвязи солнечных вспышек и протонных событий [1–3, 7]. Момент первого прихода солнечных протонов на орбиту Земли в табл. 1 указан по данным ACS SPI (превышение над фоном HXR излучения) и по данным нейтронных мониторов — начало GLE события.

Вспышка X1.0 28 октября 2021 г. примечательна тем, что о ее радиоизлучении на частотах выше 610 МГц по данным Radio Solar Telescope Network (RSTN) нет информации в файле 20211028events.txt [8]. Возможно, интенсивность радиоизлучения этих частотах не превысила порог регистрации RSTN. Нам известна еще только одна вспышка, в которой отсутствовало радиоизлучение на ча-

стотах выше 1415 ГГц, но при этом она сопровождалась HXR излучением — C7.2 22 декабря 2009 г. [11].

Взаимосвязь развития явлений во вспышке 28 октября 2021 г. и ускорения КВМ иллюстрирует рис. 1а. Вблизи 0 мин практически одновременно началось HXR (ACS SPI) и радиоизлучение на частотах 610–245 МГц RSTN, рост EM (SXR) (см. рис. 1а и табл. 1). На развитие вспышек на больших высотах в короне, как в случае 17 мая 2012 г. [3], так и 28 октября 2021 г, указывает радиоизлучение на частоте 245 МГц, (табл. 1), малый темп счета ACS SPI и относительно малые величины dEM/dt .

По величине EM можно оценить линейный размер SXR источника. Действительно, $L(t) < \sqrt[3]{EM(t)/2n_0(t)^2}$, где n_0 — концентрация плазмы источника радиоизлучения. При $t = 0$ мин $EM = 1.8 \cdot 10^{48}$ см^{−3}, для концентраций плазмы $4.6 \cdot 10^9$ и $7.4 \cdot 10^8$ см^{−3}, характерных для плазменных частот 610 и 245 МГц, получаем линейные размеры 35 и 118 Мм. В максимуме температуры $t = +3.5$ мин $EM = 1.8 \cdot 10^{49}$ см^{−3} и соответствующие оценки линейных размеров SXR источника будут 75 и 254 Мм, а в максимуме меры эмиссии при $t = +9.5$ мин $EM = 4.0 \cdot 10^{49}$ см^{−3} — 98 и 332 Мм. Таким образом, первичное ускорение электронов и выделение энергии происходило в нижней короне на высотах ~ 35 –100 Мм. Эти оценки обосновывают выбор положения КВМ перед началом его ускорения R_0 , который сделан ниже.

По нашим представлениям эффективное ускорение КВМ происходит на фоне роста T и EM [3, 5], при их положительных производных (рис. 1а). Для оценки положения КВМ до его появления в поле зрения LASCO C2 мы используем метод сшивки равноускоренного и равномерного движения [5]. Предполагаем, что КВМ начинает

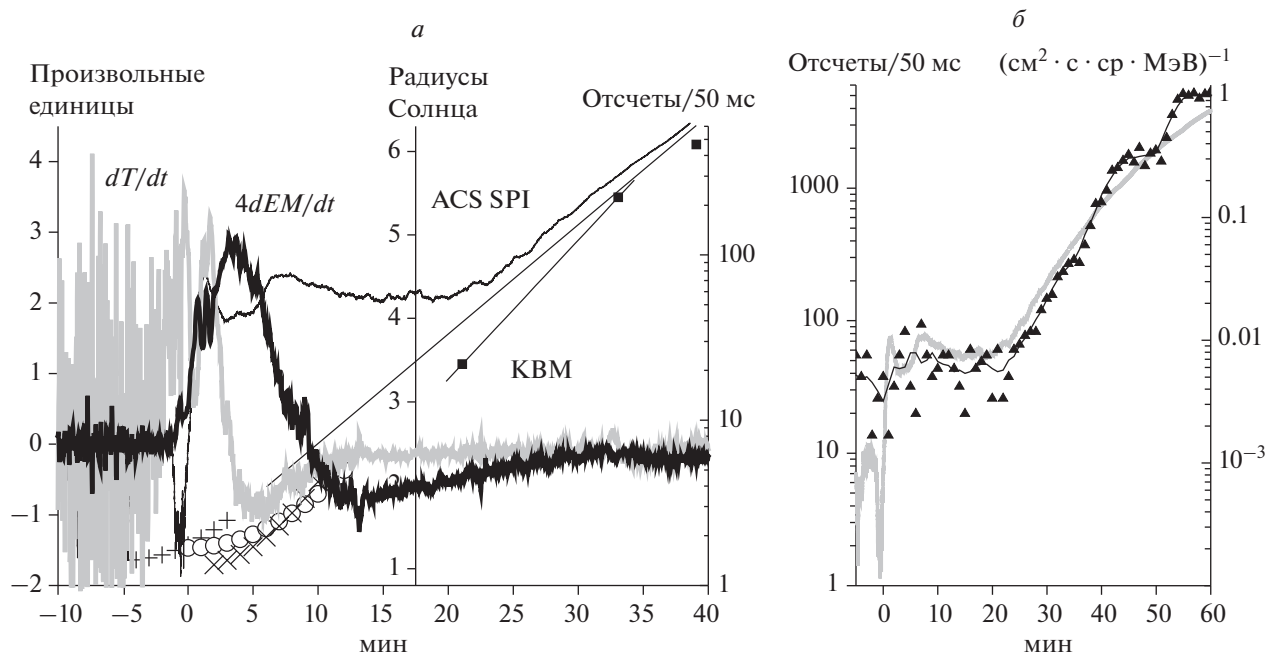


Рис. 1. Событие 28 октября 2021 г. Производные по времени температуры и меры эмиссии вспышечной плазмы (а) — толстые серая и черная кривые; темп счета ACS SPI за 50 мс (сглаженные средние за 1 мин, фон вычтен) — темно серая кривая. Положения КВМ — черные квадраты (наблюдения LASCO), черные прямые (линейные аппроксимации наблюдений) — “ранняя” и “поздняя”. Результаты расчета положения КВМ при разных параметрах шивки и ускорения (см. описание в тексте и параметры в табл. 2): крестики “+” — “ранняя аппроксимация” и $R_0 = 1.1 \cdot R_S$; открытые кружки — “поздняя аппроксимация” и $R_0 = 1.25 \cdot R_S$; крестики (x) — “поздняя аппроксимация” и $1.1 \cdot R_S$. Временные профили темпа счета ACS SPI за 50 мс (б) (толстая серая кривая — сглаженные средние за 1 мин, фон вычтен) и потока электронов 2.64–10.4 МэВ SOHO/EPHIN (черные треугольники — 1 мин средние, тонкая черная линия — сглаженные средние за 5 мин).

двигаться из положения R_0 в момент t_0 с начальной скоростью $V_0 = 0$ и ускорением $a = \text{const}$ до момента t . После момента t до положения R КВМ движется со скоростью $V = \text{const}$, которая известна из наблюдений коронографа LASCO. Линейная аппроксимация положений КВМ в различные моменты наблюдений — это $R(t) = A + Bt$. Из условий шивки находим, что $t = (2R_0 - 2A - Bt_0)/B$.

В табл. 2 и на рис. 1а представлены два варианта аппроксимации наблюдений LASCO — “ранняя” (использованы все зарегистрированные положения КВМ) и “поздняя” (использованы первое и второе положения КВМ) для двух значений $R_0 = 1.1R_S$ и $R_0 = 1.25R_S$. Нижние индексы у величин t и a в табл. 2 соответствуют выбранному значению R_0 . На рис. 1а видно, что “ранняя аппрок-

симация” “промахивается” относительно времени развития вспышки.

Согласно оценкам [12] длина пути, пройденного солнечными протонами 28 октября 2021 г. была ≈ 1.4 а.е. Для протонов 100 и 500 МэВ ($V/c = 0.43$ и 0.76) время запаздывания относительно электромагнитного сигнала будет ~ 10 мин и ~ 7 мин. Если первые протоны были зарегистрированы на +20 мин (табл. 1), то момент их выхода на нужную силовую линию будет на +10 мин и +13 мин, соответственно. Таким образом, протоны от 100 до 500 МэВ ускорялись во время наибольшего энерговыделения вспышек — ускорения КВМ согласно “поздней аппроксимации” (см. рис. 1а и табл. 2).

Сравнение временных профилей интенсивности электронов 2.64–10.4 МэВ SOHO/EPHIN [13]

Таблица 2. Режимы ускорения КВМ от вспышки X1.0 28.10.2021

	t_0 , с	A , км	B , км/с	$t_{1.1}$, с	$a_{1.1}$, км/с ²	$t_{1.25}$, с	$a_{1.25}$, км/с ²
Ранняя	−300	829451	1520	216	2.9	354	2.5
Поздняя	0	−44488	1934	766	2.5	946	2.0
	180			658	4.0	674	3.9

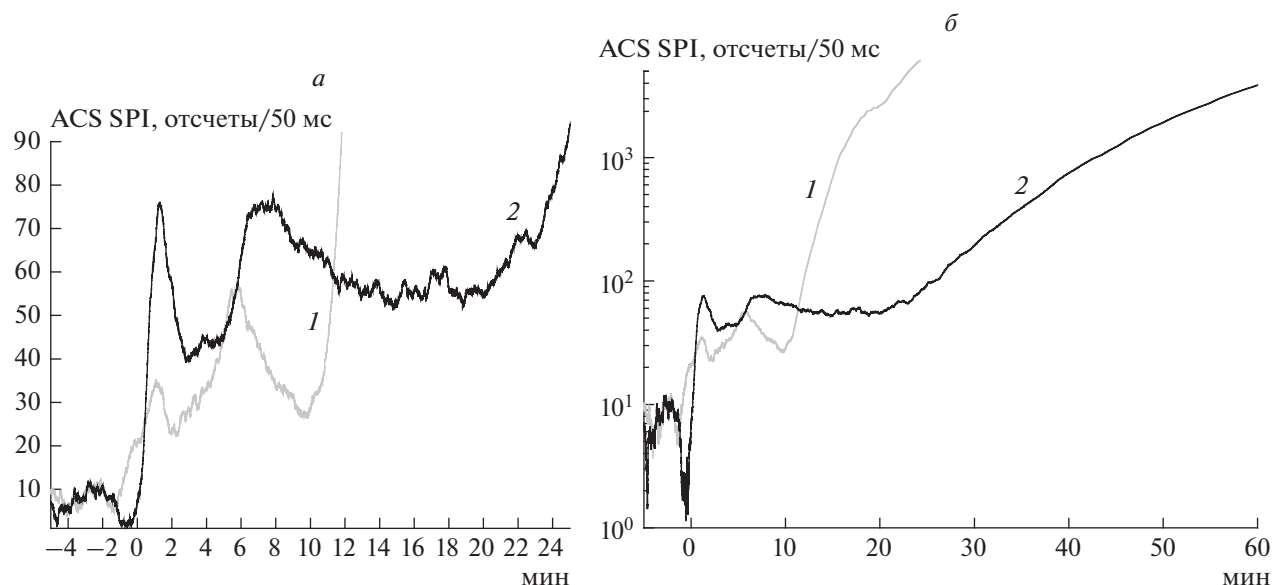


Рис. 2. Временные профили темпа счета ACS SPI за 50 мс (сглаженные средние за 1 мин, фон вычтен) в событиях: (1) – 17 мая 2012 г. и (2) 28 октября 2021 г. Панели (а) и (б) различаются горизонтальными и вертикальными масштабами.

и темпа счета ACS SPI показаны на рис. 1б. Видно подобие временных профилей примерно с +25 мин. Не исключено, что значительные флуктуации потока электронов между 0 и +20 мин (рис. 1б) связаны с отдельными актами ускорения электронов. Интенсивность НХР была значительно выше фона (рис. 2а) до начала протонного возрастания ACS SPI, поэтому, по крайней мере, электроны >100 кэВ ускорились в это время.

ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2а сравниваются временные профили ACS SPI в событиях 28 октября 2021 г. и 17 мая 2012 г. в линейном масштабе. Большой темп счета НХР излучения 28 октября 2021 г. может быть связан как с большим числом уже ускоренных не-тепловых электронов, так и большей *ЕМ* (концентрацией частиц и объемом излучающей SXR плазмы). Действительно в событии X1.0 28 октября 2021 г. *ЕМ* была больше, чем *ЕМ* в M5.1 17 мая 2012 г., между +0.5 и +16.7 мин.

По классификации [14] обе вспышки относятся к стандартным эруптивным вспышкам, происходящим над группами пятен. По нашему мнению [15], эруптивные вспышки надо разделять на две группы: с выраженной и не выраженной импульсной фазой в SXR излучении. Сравнивая dT/dt и dEM/dt в двух рассматриваемых вспышках (рис. 1а и см. рис. 3 [3]) можно заключить, что импульсная фаза во вспышке X1.0 28 октября 2021 года выражена сильнее.

Согласно наблюдениям EOVSA (the extended Owens Valley Solar Array) вспышки X1.0 28 октября 2021 г. максимум спектра микроволнового излу-

чения 1–18 ГГц наблюдался на частоте ~5 ГГц. Поток в максимуме спектра был менее 1000 СЕП [16]. В работе [17] сделан вывод, что спектр радиоизлучения вспышки X1.0 28 октября 2021 г. не является характерным для протонных вспышек. Заметим, что согласно критерию “протонности” по радиоизлучению вспышек [18], как вспышка X1.0 28 октября 2021 г., так вспышка M5.1 17 мая 2012 г., таковыми быть не должны.

Временная динамика НХР излучения (вспышечного энерговыделения) в рассматриваемых двух вспышках схожа первые ~10 мин. В этот отрезок времени в нижней короне происходит мощное энерговыделение (способствующее стохастическому ускорению заряженных частиц) и ускорение КВМ – “синергия” вспышек и КВМ. Понятие “синергии” было введено в работе [19], где было проведено комплексное исследование события 10 сентября 2017 г. (GLE 72). Однако, несмотря на схожую “синергию” (динамику процессов ускорения) и близкие длины пути распространения частиц $\approx (1.3 \pm 0.1)$ а.е. [3, 12], в двух рассматриваемых событиях значимо различаются времена первого видимого отклика ACS SPI на приход первых солнечных протонов и скорости роста протонного сигнала ACS SPI (рис. 2).

В случае протонного события 17 мая 2012 г. (GLE 71) условия выхода и распространения частиц в межпланетном пространстве до Земли были наиболее благоприятными (N11W76, PA = 268), что обеспечило ранний приход протонов и быстрый рост их интенсивности. В случае же события 28 октября 2021 года (GLE 73) положение активной области на солнечном диске (S26W05) и распространение КВМ в южном на-

правлении (РА ~ 190) не были благоприятными, что создало условия для позднего прихода протонов и медленного роста их интенсивности. Отметим, что исследование анизотропии протонов в [12] показало приход протонов с южного направления. Это указывает на то, что процесс коронального распространения солнечных протонов [20] непосредственно связан с распространением и расширением корональной плазмы.

Электроны и протоны ускорялись стохастически во множество элементарных актов, чья длительность меньше всего события, до, во время и после ускорения КВМ. В этом случае большое количество протонов, способных генерировать π_0 -мезоны, находились длительное время между областью вспышки и фронтом КВМ, а распадающиеся π_0 -мезоны были источником длительного γ -излучения с энергией > 100 МэВ. Действительно по информации [16] такое солнечное излучение наблюдалось детектором Fermi/LAT 28 октября 2021 г.

Авторы благодарны участникам космических экспериментов ACS SPI, GOES, EPHIN и LASCO за возможность использовать открытые данные.

Работа была поддержана субсидиями по теме “Плазма” (АБС и АМС) в ИКИ РАН и теме “Энерговыведение” (ИЮГ) в ГАО РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И. и др. // Физ. плазмы. 2020. Т. 46. № 2. С. 139; *Struminskii A.B., Grigor'eva I.Yu., Logachev Yu.I. et al. // Plasma Phys. Rep.* 2020. V. 46. No. 2. P. 176.
2. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И. и др. // Астрофизика. 2020. Т. 63. № 3. С. 437; *Struminsky A.B., Grigor'eva I.Yu., Logachev Yu.I. et al. // Astrophysics.* 2020. V. 63. No. 3. P. 388.
3. Григорьева И.Ю., Струминский А.Б. // Астрон. журн. 2022. Т. 99. № 6. С. 486; *Grigorieva I.Yu., Struminsky A.B. // Astron. Reports.* 2022. V. 66. No. 6. P. 481.
4. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 8. С. 1180; *Struminsky A.B., Grigorieva I.Yu., Logachev Yu.I., Sadovskii A.M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 8. P. 907.
5. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М. // Геомагн. и аэронаом. 2021. Т. 61. № 6. С. 683; *Struminskii A.B., Grigorieva I.Yu., Logachev Yu.I., Sadovskii A.M. // Geomagn. Aeron.* 2021. V. 61. No. 6. P. 781.
6. Papaioannou A., Kouloumvakos A., Mishev A. et al. // *Astron. Astrophys.* 2022. V. 660. Art. No. L5.
7. Струминский А.Б. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 597; *Struminsky A.B. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No. 5. P. 538.
8. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/org_events_text.
9. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list.
10. <https://isdc.unige.ch/~savchenk/spiaccs-online/spiaccs-ip-nlc.pl>.
11. Григорьева И.Ю., Струминский А.Б., Шаховская А.Н. // Тр. XXV конф. “Солнечная и солнечно-земная физика-2021” (Санкт-Петербург, 2021). С. 101.
12. Mishev A.L., Leon G., Kocharov L.G. et al. // *Sol. Phys.* 2022. V. 298. P. 88.
13. <http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm>.
14. Ishkov V.N. // *Astron. Astrophys. Trans.* 2001. V. 20. No. 3. P. 563.
15. *Struminsky A.B., Logachev Yu. I., Grigorieva I.Yu. et al. // Geomagn. Aeron.* 2020. V. 60. P. 1057.
16. Klein K.-L., Musset S., Vilmer N. et al. // *Astron. Astrophys.* 2022. V. 663. P. A173.
17. Chertok I.M. // *MNRAS.* 2022. V. 517. P. 2709.
18. Чепток И.М. // Геомагн. и аэронаом. 2018. Т. 58. С. 471; *Chertok I.M. // Geomagn. Aeron.* 2018. V. 58. P. 457.
19. Kocharov L., Omodei N., Mishev A. et al. // *Astrophys. J.* 2021. V. 915. P. 12.
20. Базилевская Г.А. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т. 48. С. 11.

Solar relativistic electrons and protons on October 28, 2021 (GLE73)

A. B. Struminsky^a, *, I. Yu. Grigorieva^b, Yu. I. Logachev^c, A. M. Sadovskii^a

^a Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

^b Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Saint-Petersburg, 196140 Russia

^c Lomonosov Moscow State University, Scobel'syn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 111234 Russia

*e-mail: astruminsky@gmail.ru

The proton event of October 28, 2021, which was accompanied by the first in the current 25th cycle and the 73rd in the history of observations, a ground-based enhancement in the intensity of cosmic rays (GLE73), is considered. The development of the parent flare lasted more than 10 min against the background of the highest energy release simultaneously creating the conditions both for acceleration of the coronal mass ejection (CME) and acceleration of charged particles to relativistic energies. The similarity of time intensity profiles of relativistic electrons and protons in the Earth's orbit indicates a stochastic mechanism of their acceleration. The X1.0 eruptive flare on October 28, 2021, is similar in hard X-ray emission to the M5.1 flare on May 17, 2012 (GLE71). The relatively late start of the increase in the fluxes of relativistic electrons and protons in the Earth's orbit compared to the GLE71 event is explained by the location of the flare on October 28, 2021 (S26W05) and the southward launch of the CME.