

УДК 524.1-52:523.9

СОЛНЕЧНЫЕ ПРОТОННЫЕ СОБЫТИЯ В ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ 21–24

© 2015 г. Г. А. Базилевская¹, Ю. И. Логачёв², Э. В. Вашенюк³, Е. И. Дайбог²,
В. Н. Ишков^{4, 5}, Л. Л. Лазутин², Л. И. Мирошниченко^{2, 4}, М. Н. Назарова⁶,
И. Е. Петренко⁶, Г. М. Сурова², О. С. Яковчук²

E-mail: bazilevs@sci.lebedev.ru

Показано, что, несмотря на низкую солнечную активность на фазе роста и максимума цикла 24, число солнечных протонных событий (СПС) с энергией протонов $E > 10$ МэВ и $E > 100$ МэВ в этом цикле мало отличается от числа таких же событий в предшествующих циклах 21–23. При этом наблюдается дефицит наиболее мощных событий типа GLE, которые характеризуются высокими значениями потока протонов с $E > 100$ МэВ. Отношение числа СПС с $E > 10$ МэВ и $E > 100$ МэВ к числу солнечных пятен в цикле 24 выросло вдвое по сравнению с циклами 21–23, а относительное число GLE вдвое уменьшилось. Характеристики вспышек и выбросов корональной массы, ассоциированных с протонными событиями с $E > 100$ МэВ, в цикле 24 практически не отличаются от аналогичных параметров в цикле 23.

DOI: 10.7868/S0367676515050142

ВВЕДЕНИЕ

Энергичные солнечные частицы, или солнечные космические лучи (СКЛ), регистрируются в межпланетном и околоземном пространстве после мощных взрывных энерговыделений на Солнце. Энергия СКЛ во много раз превосходит энергию других солнечных частиц и излучений, достигая иногда десяти ГэВ и выше. В этом случае СКЛ генерируют каскады в атмосфере Земли и регистрируются наземными установками, представляя собою особый класс событий СКЛ — так называемые наземные возрастания (GLE). Эти события представляют большой интерес как для выяснения механизмов ускорения и распространения заряженных частиц на Солнце и в межпланетной среде, так и для определения радиационной опасности в околоземном пространстве. Текущий 24-й цикл солнечной активности отличается дефицитом на-

земных возрастаний. На апрель 2014 г. (64-й месяц с начала цикла 24), зарегистрировано всего два таких события (17.05.2012 г. и 06.01.2014 г. [1, 2]), тогда как в предыдущих циклах за тот же период было зарегистрировано от 7 до 13 событий. Мы анализируем солнечные протонные события (СПС) и сопровождающие их явления на Солнце на протяжении 21–24 циклов активности, обращая внимание на наиболее мощные СПС.

СТАТИСТИКА СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ

Начиная с 1970 г., СПС, в которых наблюдались протоны с энергией $E > 10$ МэВ и потоком $J \geq 1$ pfu ($1 \text{ pfu} = 1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$), собраны в каталогах под редакцией Ю.И. Логачева [3]. Эти каталоги содержат также данные о родительских вспышках и других сопутствующих явлениях и являются однородными рядами данных, поскольку критерии отбора событий оставались неизменными во время работы над Каталогами с начала 1980-х годов. Однородность длительных временных рядов — это необходимое условие статистических исследований, поэтому данная работа базируется на [3], хотя для сравнения привлекались результаты других каталогов [4–7]. Помимо опубликованных каталогов данная работа содержит результаты текущей работы авторов по анализу событий 23-го и 24-го солнечных циклов — с 1997 г. по апрель 2014 г. (64-й месяц 24-го солнечного цикла).

Первое событие 24-го цикла с потоком солнечных протонов в максимуме временного профиля

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение Российской академии наук Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва.

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ).

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Полярный геофизический институт Кольского научного центра Российской академии наук (ПГИ КНЦ РАН).

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН).

⁵ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук.

⁶ Федеральное государственное бюджетное учреждение “Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова”.

Таблица 1. Статистика СПС за первые 64 месяца циклов 21–24

	Начало	Месяц 64	Число событий за 64 месяца		
			GLE	$N(>100 \text{ МэВ})$	$N(>10 \text{ МэВ})$
21	1976.5	1981.71	8	37	84
22	1986.8	1992.04	13	55	105
23	1996.4	2001.63	7	30	50
24	2009.0	2014.29	2	37	64

$J(>10 \text{ МэВ}) \geq 1 \text{ pfu}$ произошло в августе 2010 г., в 20-м месяце после начала цикла. Для сравнения активность СКЛ в цикле 21 началась в 3-м месяце после начала цикла, а в циклах 22 и 23 — в 8-м и

19-м месяцах соответственно. Несмотря на слабое, по сравнению с предыдущими циклами, развитие пятнообразовательной активности, число СПС с протонами с энергией выше 10 МэВ и выше 100 МэВ — $N(>10 \text{ МэВ})$ и $N(>100 \text{ МэВ})$ на фазе роста и максимума цикла 24 вполне сравнимо с предыдущими циклами, тогда как число GLE заметно меньше. Данные о солнечной активности и числе СПС за первые 64 месяца циклов 21–24 представлены в табл. 1 и 2.

Чтобы учесть, что цикл 24 слабее предыдущих циклов по числу пятен R_z [8], можно использовать накопленное за 64 месяца число пятен ΣR_z и отнести к нему число СПС. Накопленное число событий в данный месяц представляет собой сумму событий за время, прошедшее с начала цикла. Результаты даны в табл. 2. Видно, что относительное число СПС с $E > 10 \text{ МэВ}$ и $E > 100 \text{ МэВ}$ заметно возросло в цикле 24, тогда как относительное число GLE упало.

Соотношение между накопленными числами СПС с $E > 10 \text{ МэВ}$ и $E > 100 \text{ МэВ}$ в циклах 21–24 показано на рис. 1а, откуда видно, что все циклы достаточно похожи и цикл 24 не отличался по этому параметру от предыдущих циклов. События с $E > 10 \text{ МэВ}$ и $E > 100 \text{ МэВ}$ начинаются примерно одновременно, с разницей менее полугода, и соотношение между ними сохраняется в течение цикла. События GLE в циклах 21, 22, 23 и 24 начались через 15, 33, 18 и 40 месяцев после начала цикла соответственно. Это видно на рис. 1б, где показано соотношение между накопленными числами СПС с $E > 10 \text{ МэВ}$ и GLE. Видно, что это соотношение подобно для циклов 21 и 23, а в циклах 22 и 24 генерация GLE запаздывала по сравнению с СПС ($E > 10 \text{ МэВ}$). В цикле 22, в котором долгое время не было GLE, соотношение между ними и СПС ($E > 10 \text{ МэВ}$) быстро достигло значения, близкого к циклам 21 и 23. В цикле 24 первое наземное возрастание СКЛ произошло на 41-м месяце цикла, и к 64-му месяцу их всего 2, причем официально признано только 17.05.2012 г.

Считая, что цикл 23 был типичным по характеристикам СПС и наиболее полно отражен в данных о возможных источниках солнечных протонов, дальнейшее рассмотрение ограничим циклами 23 и 24. Сосредоточим внимание на СПС с

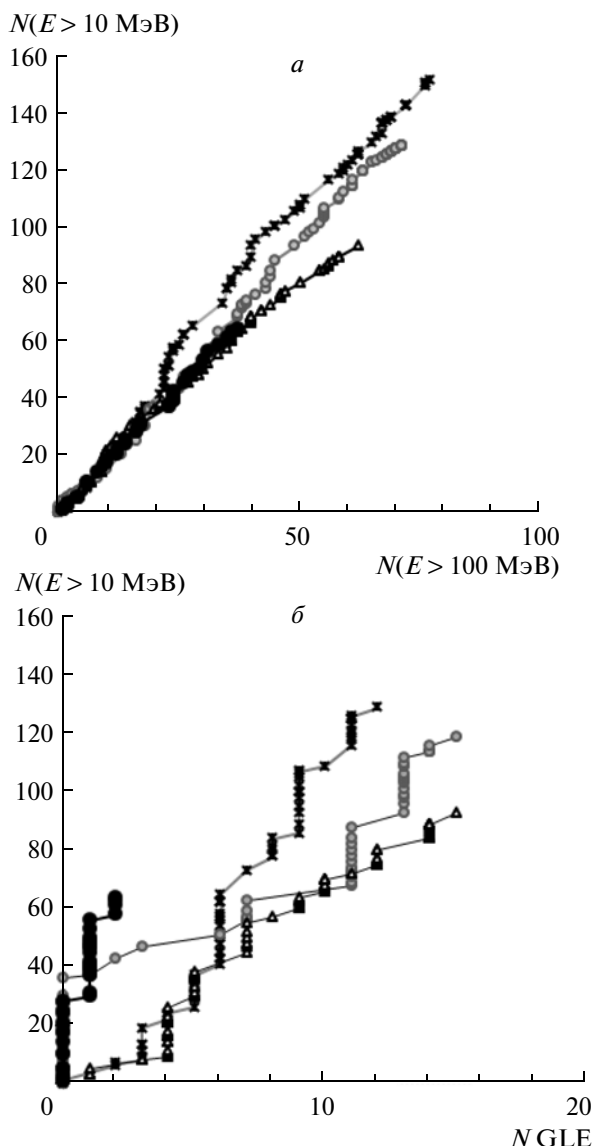


Рис. 1. а — соотношение между числом событий с протонами с $E > 10 \text{ МэВ}$ и $E > 100 \text{ МэВ}$ в циклах 21 (крестики), 22 (серые кружки), 23 (светлые треугольники) и 24 (черные кружки). Для цикла 24 взяты данные по апрель 2014 г.; б — то же, но для событий с протонами с $E > 10 \text{ МэВ}$ и числа GLE.

протонами $E > 100$ МэВ, которые включают в себя GLE, и попытаемся найти различия в характеристиках СПС (>100 МэВ) для циклов 23 и 24. Распределение событий на интервал потока для $J(>100$ МэВ) оказалось более крутым в цикле 24 ($\propto J^{-1.3}$), чем в цикле 23 ($\propto J^{-1.1}$). Кроме того, в цикле 24 вообще отсутствовали события с $J(>100$ МэВ) > 100 pfu. В распределении 23-го цикла такие события составляли более 5%. Следует заметить, что именно GLE характеризуются высокими значениями $J(>100$ МэВ). Таким образом, дефицит GLE в цикле 24, по-видимому, отражает отсутствие интенсивных потоков протонов с $E > 100$ МэВ.

ВСПЫШКИ И КВМ, СВЯЗАННЫЕ С СОБЫТИЯМИ, В КОТОРЫХ НАБЛЮДАЛИСЬ ПРОТОНЫ С $E > 100$ МэВ

Известно, например, [9–10], что наиболее вероятными источниками ускоренных частиц, регистрируемых после взрывных энерговыделений на Солнце, являются вспышки и корональные выбросы массы (КВМ). Как правило, частицы генерируются вспышками, имеющими рентгеновский класс $>M5$ [11, 12]. Уменьшение числа таких вспышек наблюдалось, уже начиная с цикла 23. Максимальное сглаженное по 7 месяцам число вспышек балла М в 22 и 23 циклах было ~ 50 и ~ 30 , вспышек балла X было ~ 6 и ~ 2 . В течение первых 64 месяцев цикла 24 максимальное сглаженное число вспышек балла М было ~ 9 , а вспышек балла X ~ 0.6 [13]. При этом характеристики вспышек, связанных с генерацией протонов с энергией >100 МэВ, практически не изменились: средний балл рентгеновских вспышек в первые 64 месяца для 23-го и 24-го циклов М5 и М8.

Корональные выбросы массы, ассоциированные с солнечными событиями с протонами с $E > 100$ МэВ, имеют высокие скорости (в среднем >1200 км \cdot с $^{-1}$) и большой угол раствора (около 70% из них “гало”). Доля КВМ со скоростью >1200 км \cdot с $^{-1}$ очень мала. В цикле 23, по измерениям [14], она составила 1.87%, а за 64 месяца цикла 24 – 0.73%, т.е. сократилась в 2.5 раза. В то же время параметры КВМ, связанных с СПС, в которых наблюдались протоны с $E > 100$ МэВ, в первые 64 месяца циклов 23 и 24, различаются не очень сильно: средняя скорость в 23-м цикле 1460 ± 73 км \cdot с $^{-1}$, в 24-м цикле 1235 ± 89 км \cdot с $^{-1}$. В работе [15] высказано предположение, что уменьшение числа GLE при одновременном сравнительно малом уменьшении общего числа СПС в цикле 24 связано с увеличением угла раствора КВМ, которое вызвано падением полного (магнитного и плазменного) давления в окружающей среде. Уменьшение альвеновской скорости ведет

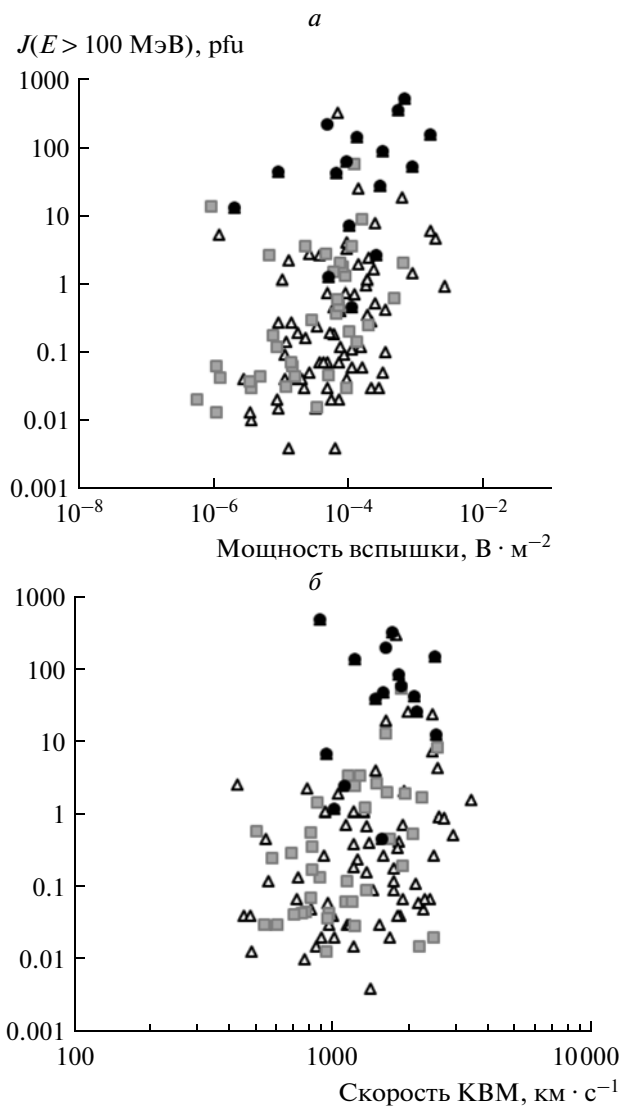


Рис. 2. *a* – поток солнечных протонов с $E > 100$ МэВ в максимуме временного профиля СПС в зависимости от мощности родительской вспышки для солнечных циклов 23 (светлые треугольники) и 24 (серые квадраты), GLE отмечены черными кружками; для цикла 24 взяты данные по апрель 2014 г; *б* – то же, но в зависимости от скорости коронального выброса массы.

к более легкому формированию ударной волны, но эффективность ускорения частиц уменьшается. Однако наш анализ событий с протонами >100 МэВ показал, что для этих событий средний угол раствора КВМ составлял $305.2^\circ \pm 10.5^\circ$ в цикле 23 и $301.6^\circ \pm 17.5^\circ$ в цикле 24, т.е. они практически совпадают.

Соотношения между значениями $J(>100$ МэВ) и баллом связанных с ними рентгеновских вспышек показаны на рис. 2*a*, аналогичное соотношение между $J(>100$ МэВ) и скоростью КВМ – на рис. 2*б*. Видно, что распределения $J(>100$ МэВ) по

Таблица 2. Число СПС, отнесенное к числу солнечных пятен за первые 64 месяца солнечного цикла

Цикл	Месяц 64	R_z	ΣR_z за 64 месяца	Отношение числа СПС к ΣR_z , умноженное на 100		
				GLE	$N(>100 \text{ МэВ})$	$N(>10 \text{ МэВ})$
21	1981.71	167	6481	0.12	0.57	1.3
22	1992.04	150	7108	0.18	0.77	1.48
23	2001.63	107	4471	0.16	0.67	1.12
24	2014.29	85	2731	0.07	1.35	2.34

указанным параметрам источников для циклов 23 и 24 не разделяются. Хотя GLE связаны с более мощными вспышками и более быстрыми КВМ, они не образуют выделенной группы в распределениях на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение однородного ряда событий СКЛ на базе каталогов [3] обнаружило удивительный факт: несмотря на низкую солнечную активность на фазе роста и максимума цикла 24, число событий СКЛ с энергией протонов $E > 10 \text{ МэВ}$ и $E > 100 \text{ МэВ}$ в этом цикле мало отличается от числа таких же событий за первые 64 месяца с начала предшествующих циклов 21–23. Однако при этом наблюдается дефицит наземных возрастаний GLE. Заслуживает дальнейшего изучения относительный рост сравнительно малоэнергичных СПС. Отношение числа СПС с $E > 10 \text{ МэВ}$ и $E > 100 \text{ МэВ}$ к суммарному (накопленному) числу пятен за первые 64 месяца в цикле 24 почти вдвое выше, чем в предыдущих циклах, тогда как для GLE это отношение вдвое упало.

Хотя отношение числа событий с $E > 10 \text{ МэВ}$ к числу событий с $E > 100 \text{ МэВ}$ в цикле 24 такое же, как в предыдущих 3 циклах, события с $E > 100 \text{ МэВ}$ в цикле 24 отличаются меньшей интенсивностью протонов в максимуме солнечного протонного события.

Мощность ассоциированных с СКЛ рентгеновских вспышек, скорость и угол раствора корональных выбросов массы различаются несущественно для $>100 \text{ МэВ}$ событий в циклах 23 и 24.

Полученный результат нельзя считать неожиданным. Связь СПС со вспышками и КВМ не является простой и однозначной [16, 17]. Предстоит

более детальное сопоставление солнечных циклов 21–24 по факторам, сопутствующим СПС, например таких, как особенности активной области, радиоизлучение, связанное со вспышкой, наличие одновременно нескольких КВМ в короне и межпланетной среде.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 13-02-00612.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thakur N. et al. // *Astrophys. Journ.* 2014. V. 790. L13. doi:10.1088/2041-8205/790/1/L13
2. Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Ващенко Э.В. // См. настоящий номер, с. 612.
3. www.wdcb.ru/stp/online_data.ru.html#ref113_r
4. Kurt V.G., Belov A.V., Mavromichalaki H., Gerontidou M. // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22. P. 2255.
5. <http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>
6. <http://www.sepsserver.eu>
7. <http://dec1.sinp.msu.ru/~osipenko/>
8. <http://sidc.oma.be/sunspot-data/>
9. Miroshnichenko L.I., Perez-Peraza J.A. // *Int. J. Mod. Physics. A.* 2008. V. 23(1). P. 1.
10. Reames D. V. // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 90. P. 413.
11. Базилевская Г.А., Свиржевская А.К., Сладкова А.И. // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2004. Т. 44. № 4. С. 442.
12. Belov A., Kurt V., Garcia H., Mavromichalaki H., Gerontidou M. // *Solar Phys.* 2005. V. 229. P. 135.
13. http://hesperia.gsfc.nasa.gov/goes/goes/goes_event_listings/
14. http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/
15. Gopalswamy N. et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. № 8. P. 2673.
16. Klein K.-L., Trottet G., Klassen A. // *Solar Phys.* 2010. V. 263. P. 185.
17. Klein K.-L., Trottet G., Samwel S., Malandraki O. // *Solar Phys.* 2011. V. 269. P. 309.