

УДК 550.380.12

## СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СЕНТЯБРЕ 2017 г.

© 2019 г. В. С. Махмутов<sup>1, \*</sup>, Г. А. Базилевская<sup>1</sup>, Ю. И. Стожков<sup>1</sup>, М. В. Филиппов<sup>1</sup>,  
Е. В. Калинин<sup>1</sup>, А. К. Морзабаев<sup>2</sup>, В. А. Ерхов<sup>2</sup>, Ш. Гиниятова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

\*E-mail: makhmutv@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

В работе представлены результаты анализа данных о солнечной активности и о вариациях космических лучей вблизи минимума 24-го цикла солнечной активности в сентябре 2017 г. В этот период зарегистрировано резкое увеличение солнечной вспышечной активности, сопровождавшееся геомагнитными возмущениями, форбуш-понижением интенсивности космических лучей и появлением значительных потоков солнечных космических лучей, зарегистрированных в околоземном космическом пространстве, в земной атмосфере и на наземных установках. Отдельные характеристики указанных событий представлены в данной работе.

DOI: 10.1134/S0367676519050223

### ВВЕДЕНИЕ

Интересной особенностью 11-летних циклов солнечной активности является появление мощных активных областей во время существенного спада ее уровня, практически вблизи минимума солнечной активности. Это наблюдалось, например, в конце 21-го цикла солнечной активности: в феврале 1986 г. произошли солнечные вспышки в активной области (АО) NOAA 4711 (солнечные координаты S06 W04), в том числе 6 февраля вспышка рентгеновского/оптического излучения балла X17/3B (начало в ≈06:18 UT [1]). В 22-м цикле солнечной активности – 9 июля 1996 г. в активной области NOAA 7978 (S10 W30) произошла серия вспышек, включая известное событие балла X2.2/2B (начало в ≈09:09 UT) [1, 2]. В 23-м цикле солнечной активности, в период 4–13 декабря 2006 г. наблюдалась серия вспышек рентгеновского излучения класса C, M и X в АО NOAA 10930 (S07 E79), среди которых мощная вспышка балла X3.4/4B 13 декабря 2006 г. (≈02:40 UT) [1, 3]. Завершающийся 24-й солнечный цикл подтверждает эту особенность: в сентябре 2017 г. на Солнце появилась активная область NOAA 12673 (S11 W16), в которой произошел ряд солнечных вспышек, включая мощные вспышки 6 сентября (X9.3) и 10 сентября (X8.2) [4, 5]. Следует отметить, что появление вспышечных потоков частиц на орбите Земли и проявление геомагнитных воз-

мущений зависят, в основном, от взаимного положения активной области на Солнце и земного наблюдателя относительно силовых линий межпланетного магнитного поля, вдоль которых происходит перенос основного потока солнечных космических лучей. Поэтому в ряде случаев мощная солнечная вспышка, произошедшая в “неблагоприятной” восточной части солнечного диска (или вблизи центрального меридиана), может привести к появлению больших потоков солнечных протонов с энергиями меньше 100 МэВ на орбите Земли при полном отсутствии протонов ГэВ-ных энергий.

### СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ В СЕНТЯБРЕ 2017 г.

В сентябре 2017 г. на Солнце появилась активная область NOAA 12673 (S11 W16), в которой произошел ряд солнечных вспышек: вспышки 4 и 5 сентября привели к появлению межпланетного возмущения и геомагнитной бури, наблюдавшихся с 6 по 10 сентября. В этот период зарегистрирована серия форбуш-понижений интенсивности галактических космических лучей (КЛ), наблюдавшихся мировой сетью наземных нейтронных мониторов NMDB [6]. На рис. 1 для примера приведены временные профили скорости счета высокоширотных нейтронных мониторов (НМ) Терра

Адели (кривая 1; Terre Adelie; жесткость геомагнитного обрезания  $R_c = 0.01$  ГВ) и Апатиты (кривая 2;  $R_c = 0.65$  ГВ) в период с 6 сентября (12 UT) по 11 сентября (24 UT) 2017 г. Понижение интенсивности ГКЛ с амплитудой  $\approx 2\%$  произошло в начале 7 сентября с началом геомагнитной бури. Далее значительное уменьшение потоков КЛ продолжилось в конце 7 сентября, оно достигло максимального спада 8 сентября ( $\approx 14-16$  UT) с величинами  $\approx 10$  и  $\approx 8\%$ , на НМ Терра Адели и Апатиты, соответственно. Это понижение КЛ приходится на главную фазу геомагнитной бури, когда величина геомагнитного часового индекса Dst уменьшилась до  $-124$  нТ, а 3-х часовой планетарный геомагнитный индекс  $K_p$  достиг величины 8.3. На низкоширотных НМ с жесткостью геомагнитного обрезания  $R_c > 5$  ГВ уменьшение потока ГКЛ в это время составило меньше 1%. Восстановление потоков ГКЛ началось 8 сентября (позже 16 UT).

Первый приход потоков малоэнергичных солнечных протонов ( $< 50$  МэВ; по данным измерений на борту GOES-13) зарегистрирован 4 сентября в  $\approx 23$  UT. Источником этих частиц является серия солнечных вспышек класса М, произошедшая 4 сентября в АО 12673 (S08 W15). Более энергичные солнечные протоны с энергией выше 100 МэВ наблюдались 6 сентября (начиная с  $\approx 13$  UT). Основными источниками этих частиц являлись солнечные вспышки класса X2.2/2В и X9.3/3В, произошедшие 6 сентября в  $\approx 08:57$  UT и  $\approx 11:53$  UT в той же АО 12673 (S09 W35). Возрастание темпа счета наземных НМ во время этих событий не зарегистрировано. Самый мощный солнечно-протонным событием явилось возрастание СКЛ 10 сентября, начавшееся в  $\approx 16:06$  UT [6], в котором наблюдалось возрастание потоков протонов в широком интервале энергий (десятки МэВ – несколько

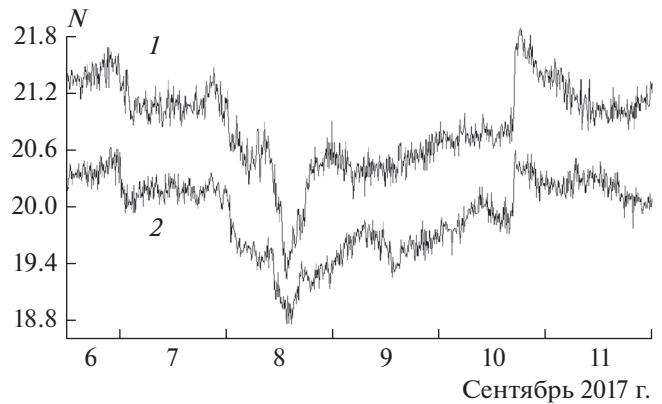


Рис. 1. Вариации темпа счета  $N$  (отн. ед.) на наземных нейтронных мониторах Терра Адели (Terre Adelie; кривая 1) и Апатиты (кривая 2) в период с 6 сентября (12 UT) по 11 сентября (24 UT) 2017 г.

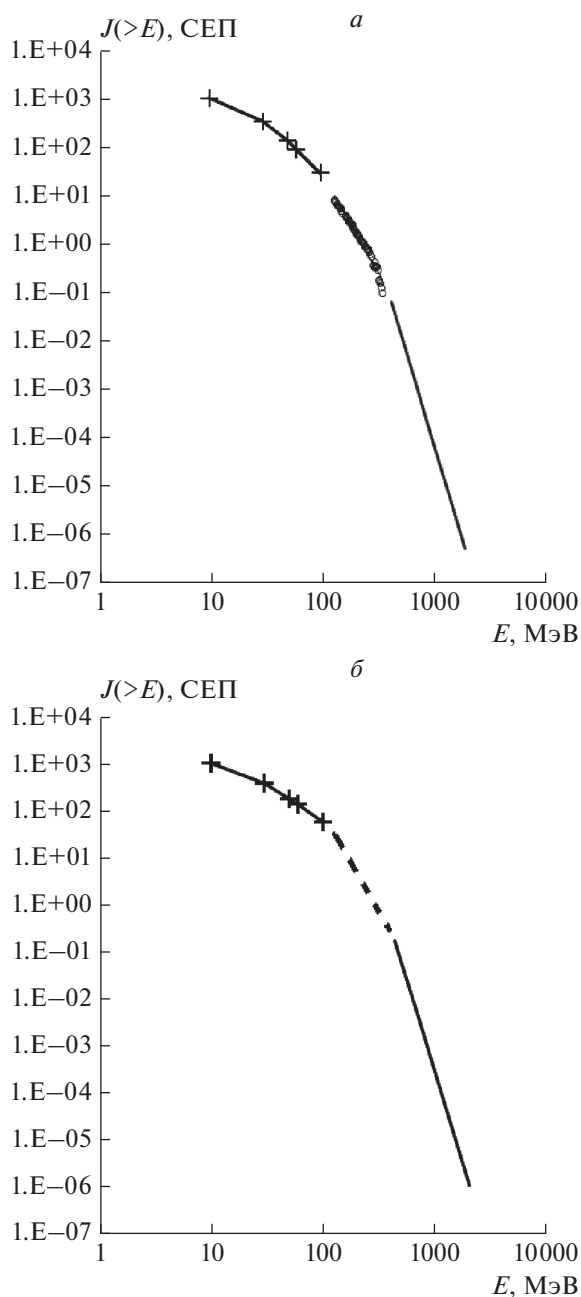
ко ГэВ). Оно зарегистрировано по данным сети НМ как наземное возрастание потоков СКЛ — событие GLE 72 (см. рис. 1). Источником этого GLE 72 является солнечная вспышка 10 сентября балла X8.2, произошедшая в 15:35 UT в АО 12673 (S09 W84) [5].

#### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ СКЛ 11 И 13 СЕНТЯБРЯ 2017 г.

Важной характеристикой процесса ускорения в солнечной вспышке, процесса распространения заряженных частиц в солнечной короне и в межпланетной среде является их энергетический спектр и его вариации во время развития вспышки. Непрерывные измерения потоков солнечных протонов на борту GOES-13 в период 3–12 сентября позволяют определить интегральные энергетические спектры частиц в области энергий 5–

**Таблица.** Основные характеристики интегральных спектров солнечных протонов, определенные по данным измерений на спутнике GOES-13 ( $E = 10-100$  МэВ), по измерениям в стратосфере ( $E = 100-500$  МэВ) в обл. Мирный (Антарктида, спектры 1 и 3) и на ст. Апатиты (Мурманска обл., спектры 2 и 4), а также на наземных нейтронных мониторах ( $E > 500$  МэВ). Для описания спектров в разных интервалах энергии ( $\Delta E$ ) использованы две формы представления спектров: экспоненциальная  $J(>E) = J_0 \exp(-E/E_0)$  и степенная  $J(>E) = J_0 E^{-\gamma}$

N	Дата	Время, UT	$\Delta E$ , МэВ	$J_0$ , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	$E_0$ , МэВ	$\gamma$
1	11.09.2017	08:30–09:30	10–100	1248.8	26	–3.9
			100–500	$3 \times 10^9$		
			>500	$1 \times 10^{19}$		
2	11.09.2017	12:25–13:10	10–100	1180.3	24	–3.8
			100–500	$3 \times 10^8$		
3	13.09.2017	08:55–09:15	10–100	96.8	17.9	–2.7
			100–500	$1.2 \times 10^5$		
4	13.09.2017	12:45–13:10	10–100	77.7	18.2	–3.0
			100–500	$4.4 \times 10^5$		



**Рис. 2.** *a* – Энергетический спектр солнечных протонов (*a*), восстановленный по данным измерений 11 сентября 2017 г. в 08:30–09:30 UT на борту спутника GOES (область энергий меньше 100 МэВ, кресты), по измерениям в стратосфере в облс. Мирный, Антарктида (кружки) и на наземных НМ Терра Адели и Апатиты,  $E > 500$  МэВ (сплошная линия). Единица потока протонов 1 СЕП =  $1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ; *б* – энергетический спектр Time-Of-Maximum (ТОМ), определенный по данным GOES-13 (кресты) и наземной сети нейтронных мониторов (сплошная линия) для солнечного протонного события 10 сентября 2017 г. (GLE72). Штриховая линия соответствует интерполяции между данными GOES-13 и данными наземных НМ.

100 МэВ. Баллонные измерения солнечных протонов в земной атмосфере были проведены в Мурманской обл. (ст. Апатиты,  $R_c = 0.65$  ГВ) и в Антарктиде (обс. Мирный,  $R_c = 0.03$  ГВ) лишь 11 и 13 сентября 2017 г. Это обусловлено стандартным графиком проведения измерений в атмосфере. Для выделения потоков солнечных протонов на фоне потоков ГКЛ и определения энергетических спектров солнечных протонов использована методика, разработанная на ДНС ФИАН [7–11]. В ней предусмотрено определение спектра поглощения протонов, введение поправок на ядерное взаимодействие высокоэнергичных протонов с энергией свыше 500 МэВ и пересчет Гросса. В области энергий свыше 450 МэВ данные о спектре протонов получены на основе измерений на наземных нейтронных мониторах. В основе примененного нами метода лежит использование коэффициентов кратности вторичной компоненты, образуемой в земной атмосфере первичными потоками высокоэнергичных солнечных протонов. Оценка максимальной энергии в спектре протонов ( $E_{\text{max}}$ ) проводилась на основе зарегистрированного широтного эффекта возрастания темпа счета наземных НМ в заданное время. Более подробно описание этого метода дано в работах [8, 9]. Полученные характеристики энергетических спектров солнечных протонов на основе их измерений на борту GOES-13 [1], в земной атмосфере и на мировой сети наземных НМ представлены в таблице. На рис. 2*a* представлен спектр протонов, определенный по описанной выше методике. В качестве баллонных измерений использованы результаты, полученные в атмосфере в облс. Мирный (Антарктида) 11 сентября, 08:30–09:30 UT. Возрастание счета на НМ Терра Адели и Апатиты составило в среднем 2%. Оценка величины  $E_{\text{max}}$  дает значение 5 ГэВ. Результаты определения характеристик энергетического спектра для других интервалов времени представлены в таблице.

Важной характеристикой солнечной вспышки является энергетический спектр солнечных протонов, определенный на основе максимальных величин потоков, зарегистрированных во время события различными детекторами и приборами (т.н. Time-Of-Maximum spectrum, или ТОМ-спектр [12]). Для его определения нами использованы данные о максимальных потоках протонов в различных энергетических интервалах, зарегистрированных на GOES-13, и данные об амплитудах возрастания счета на наземных НМ. При этом для определения спектра протонов использована вышеуказанная методика. Определенный таким образом энергетический спектр представлен на рис. 2*б*. Анализ ТОМ-спектра в этом событии приводит к выводу о том, что наблюдавшиеся потоки солнечных протонов в области энергий меньше 100–200 МэВ сопоставимы по величине с

предыдущими мощными солнечно-протонными событиями 29 сентября и 19 октября 1989 г. А в области энергий больше 1 ГэВ потоки протонов на ~3 порядка меньше, чем в указанных выше событиях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ экспериментальных данных о солнечной активности и результатов измерений космических лучей в околоземном космическом пространстве, в земной стратосфере и на наземных нейтронных мониторах в сентябре 2017 г. Этот период отмечен внезапным усилением солнечной активности и появлением ряда мощных солнечных вспышек (в том числе X-класса) в период 4–10 сентября на фоне исключительно низкого уровня солнечной активности в текущем 24-ом цикле. Эти вспышки вызвали геомагнитные возмущения и форбуш-понижение интенсивности галактических космических лучей 5–10 сентября 2017 г. Вместе с тем, большие потоки солнечных протонов с энергиями 10 МэВ–сотни МэВ зарегистрированы в околоземном космическом пространстве, в стратосфере и на наземных нейтронных мониторах. Совместный анализ указанных массивов экспериментальных данных позволил определить энергетические спектры солнечных протонов 11 и 13 сентября и ТОМ-спектр для нового события GLE 72.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН 2018 (23 П). В работе использованы данные вспышек, представленные в международной базе данных нейтронных мониторов NMDB и университета г. Оулу (Финляндия, <http://gle.oulu.fi/>).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/>.
2. *Kosovichev A.G., Zharkova V.V.* // Nature. 1998. V. 393. № 6683. P. 317.
3. [http://www.solen.info/solar/old\\_reports/2006/december/20061214.html](http://www.solen.info/solar/old_reports/2006/december/20061214.html).
4. *Krucker S., Hudson H.* // RHESSI Nugget. 2017. № 306.
5. <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2017/>.
6. <http://www.nmdb.eu>.
7. *Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al.* // Adv. Space Res. 2009. V. 44. № 10. P. 1124.
8. *Базилевская Г.А., Махмутов В.С.* // Геомагн. и аэрон. 1983. Т. 23. № 3. С. 373.
9. *Базилевская Г.А., Махмутов В.С.* // Геомагн. аэрон. 1988. Т. 28. № 2. С. 197.
10. *Makhmutov V.S., Desorgher L., Bazilevskaya G.A. et al.* // Adv. Space Res. 2007. V. 39. № 9. P. 1458.
11. *Bazilevskaya G.A., Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I. et al.* // Adv. Space Res. 2010. V. 45. № 5. P. 603.
12. *Forman M.A., Ramaty R., Zweibel E.G.* // Phys. of the Sun. Ed.: Sturrock P.A. Dordrecht: D. Reidel Publ. Co. Ch.II. 1986. P. 249.