

УДК 524.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНЫХ КРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАСС, ПРОИЗОШЕДШИХ В СЕНТЯБРЕ 2017 ГОДА, ПО ДАННЫМ МЮОННОГО ГОДОСКОПА УРАГАН

© 2019 г. Н. В. Осетрова<sup>1</sup>\*, И. И. Астапов<sup>1</sup>, Н. С. Барбашина<sup>1</sup>,  
В. В. Борог<sup>1</sup>, А. Н. Дмитриева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ”, Москва, Россия

\*E-mail: NVOsetrova@mephi.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

В начале сентября 2017 г. Солнце характеризовалось аномально высокой активностью (СА), необычной для области минимума 11-летнего цикла. Произошло большое количество мощных вспышек М- и X-класса, которые сопровождалось мощными корональными выбросами масс (КВМ). Эти события вызвали на Земле сильные магнитные бури ( $K_p$ -индекс достигал значения 8, индекс  $D_{st} < -140$  нТл). В работе рассматривается влияние этих выбросов на поток космических лучей (КЛ) по данным мюонного годоскопа УРАГАН (НИЯУ МИФИ). Исследование основывается на анализе вариаций потока мюонов космических лучей. Приводятся результаты обработки интенсивности потока методом фликкер-шумовой спектроскопии с целью определения предикторов геоэффективных возмущений магнитосферы Земли. Получен предиктор, опережающий появление возмущений в околоземном пространстве, связанных с распространением КВМ, более чем на сутки.

DOI: 10.1134/S0367676519050296

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время заканчивается 24-й солнечный цикл. В начале этого цикла (с 2009 г.) большинство исследователей прогнозировало его аномальные особенности: малое значение чисел Вольфа в максимуме и слабую вспышечную активность. Такой прогноз в целом оправдывался на протяжении всего 8-летнего периода. Однако в первой декаде сентября 2017 г. на фоне спокойного Солнца, с малым числом активных областей, происходили вспышки классов С, Ми X, общее количество которых превысило 50. В этот период также наблюдались три корональных выброса массы типа “гало-IV”. К настоящему времени опубликован ряд работ, например [1], в которых рассматриваются особенности, закономерности и динамика развития мощных солнечных вспышек в этот период. В [2] проведено гидродинамическое моделирование последовательности корональных выбросов 4 и 6 сентября. При этом возникли сложные структуры ударных волн (типа Ejecta), которые привели к удвоенному усилению геоэффективного воздействия ( $D_{st} \approx -140$  нТл). В [3] оценены плотности различных энергетических характеристик ( $E_B$ ,  $E_T$ ,  $E_V$ ) солнечного ветра в точке Лагранжа L1, связанные с величиной напря-

женности ММП ( $B$ ), температурой ( $T$ ), поведением плотности и скорости ( $V$ ) потока плазмы в течение сентября 2017 г. Получено, что в значениях  $E_B$  и  $E_V$  возникают достоверные “всплески”, опережающие на сутки приближение КВМ к Земле.

В работе приводится дистанционный мониторинг возмущений во внутренней гелиосфере и магнитосфере Земли, обусловленных распространением мощных КВМ через орбиту Земли. Результаты получены путем анализа вариаций потока мюонов космических лучей, зарегистрированных установкой УРАГАН [4].

### 1. МЕТОДИКА

Мюонный годоскоп УРАГАН представляет собой 4-модульный широкоапертурный годоскоп с общей площадью около 46 м<sup>2</sup>. Отдельные супермодули работают независимо, данные пространственной интенсивности мюонов КЛ формируются в непрерывную последовательность 1-минутных матриц [5]. В работе анализируется полный (интегральный) темп счета мюонов  $N(t)$ , просуммированный по всем супермодулям. Статистическая точность 1-минутных отсчетов составляет 0.2%.

**Таблица.** Мощные КВМ, произошедшие в сентябре 2017 г. по данным SACTus

Время начала КВМ	$\langle V_{\text{КВМ}} \rangle$ , км/с	$V_{\text{КВМmin}}$ , км/с	$V_{\text{КВМmax}}$ , км/с	Прибытие на Землю
04.09.17 19:12	624	221	1953	06.09.17
06.09.17 12:12	978	376	1955	07.09.17
10.09.17 16:48	948	104	2013	—

Прохождение частиц первичных космических лучей (ПКЛ) высокой энергии через локальную возмущенную область гелиосферы приводит к их модуляции. Попадая в атмосферу Земли, они образуют вторичные мюоны, которые также несут информацию о приобретенных вариациях. Как правило, амплитуда и характер кратковременных вариаций визуально похожи на случайные всплески. Для извлечения физической информации о моментах неслучайных всплесков в потоке КЛ используется методика фликкер-шумовой спектроскопии [6–8]. Вычисляется фактор удельной нестационарности  $C(t_k) = (\Delta Q/Q)/(\Delta T/T)$  временного ряда темпа счета мюонов  $N(t)$  для момента времени  $t_k$ , усредненный на небольшом отрезке времени  $[t_k, t_k + T]$ , с использованием переходных структурных функций  $Q(t_k)$ :

$$Q(t_k) = \frac{1}{\alpha T^2} \int_0^{\alpha T} d\tau \int_{t_k}^{t_k + T} [N(t) - N(t + \tau)]^2 dt,$$

где значения  $\Delta Q = Q_k(T) - Q_k(T - \Delta T)$ , переменная  $t_k$  – дискретное текущее время,  $k = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\alpha \leq 0.5$  – максимальная величина для отрезка корреляции,  $\Delta T$  – сдвиг интервала усреднения, принимается значение  $\Delta T \ll T$ ,  $\tau$  – временная задержка. Величина  $T$  характеризует время протекания физического процесса. Вычисление значений  $C(t_k)$  проводится последовательно на всем исследуемом интервале времени путем перемещения отрезка  $T$ .

Значения временного ряда  $C(t)$  должны изменяться от малых величин, в которых ряд  $N(t)$  является регулярным или квазигармоническим, до больших величин, где существуют резкие скачки и изломы в исходных данных  $N(t)$  [6]. Наибольшие всплески значений  $C(t)$  соответствуют моментам перестройки временного ряда, связанным с изменением физических условий в локальных областях гелиосферы, через которые проходят частицы ПКЛ.

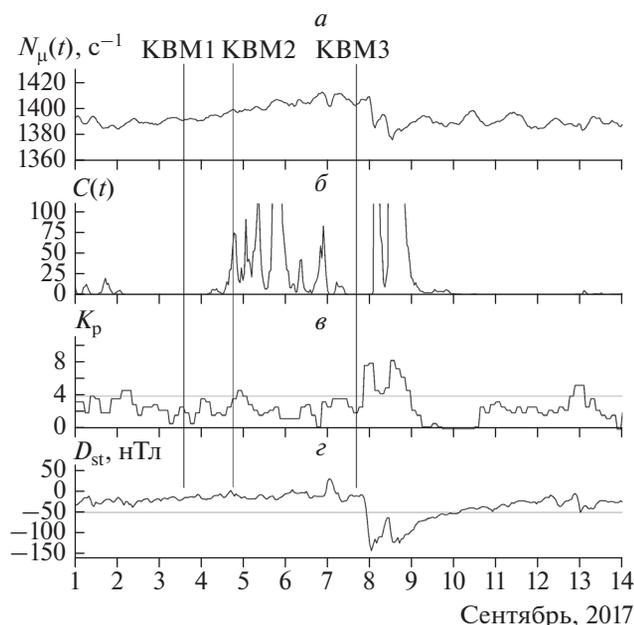
УРАГАН регистрирует поток релятивистских мюонов на поверхности земли, соответствующих ПКЛ с энергией больше десятка ГэВ, поэтому информация о всплесках  $C(t)$  может появляться с опережением по времени (часы–сутки) по сравнению с приближением гелиосферного возмущения КВМ к орбите Земли являться предиктором

разных геофизических проявлений солнечной активности.

## 2. АНАЛИЗ МОЩНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАСС

Первая декада сентября 2017 г. характеризовалась необычно высокой СА. Появление на восточной стороне диска Солнца группы пятен в активной области AR12673 произвело сильное возмущение в гелиосфере. В этот период было зарегистрировано 67 корональных выбросов масс, 27 вспышек класса М, 4 вспышки класса Х. В таблице представлены параметры трех мощных выбросов типа “гало-IV” – 4, 6 и 10 сентября. Отбор корональных выбросов массы проводится по базе данных SACTus (LASCO) [9]. При этом вспышка, сопровождающая КВМ6 сентября, типа Х9.3 являлась второй по величине пиковой интенсивности с начала 24-цикла. Также в таблице указана дата начала воздействия выброса на Землю [10]. Сопоставление направлений вылета СМЕ с модельными расчетами [11] показало, что выбросы, произошедшие 4 и 6 сентября, имели воздействие на магнитосферу Земли, а КВМ 10 сентября не был направлен в сторону Земли.

На рис. 1 представлен временной ряд скорости счета мюонов  $N_{\mu}(t)$  установки УРАГАН (рис. 1а) и соответствующий ряд значений  $C(t)$  (рис. 1б) для отрезка времени с 1 по 14 сентября, в сопоставлении с реакцией магнитного поля Земли (МПЗ) на возмущения в гелиосфере. Из первого временного ряда (рис. 1а) на фоне случайных вариаций практически невозможно непосредственно увидеть изменения в ряду счета мюонов, обусловленные влиянием КВМ. График на рис. 1б показывает, что в период 4–6 сентября в потоке мюонов возникли многочисленные нестационарности, связанные с приближением КВМ к Земле (6 сентября). Возможен также вклад других, менее мощных выбросов в этот отрезок времени. Возмущение МПЗ с 7 по 9 сентября обусловлено выбросом, начавшимся 6 сентября. В потоке мюонов (рис. 1а) приближение этого КВМ вызвало форбуш-эффект 8 сентября. Ряд  $C(t)$  отреагировал на ФЭ большим всплеском в течение суток 8 сентября.



**Рис. 1.** Временные ряды: *a* – скорости счета мюонов  $N_{\mu}(t)$  установки УРАГАН; *б* – значений  $C(t)$ , усл. ед.; *в*- и *г*-индексов геомагнитной активности  $K_p$  и  $D_{st}$ . Вертикальными линиями обозначены моменты образования мощных корональных выбросов. Горизонтальные линии на графиках *в* и *г* обозначают порог возмущенности МПЗ ( $K_p = 4$ ,  $D_{st} = -50$  нТл).

Мощная вспышка, сопровождающая КВМ 10 сентября (класс X8.2), произошла также из AR 12673, но к этой дате активная область уже переместилась к западной части диска Солнца, и ее положение было близко к залимбовому. В ряду фактора нестационарности  $C(t)$  не возникло значимых сигналов. Реакция МПЗ (рис. 1*в*, 1*г*) на залимбовый КВМ оказалась кратковременной и слабой (в конце 12 сентября). В данных  $C(t)$  соответствующий сигнал отсутствовал.

Таким образом, для двух близких КВМ (4 и 6 сентября) предикторы присутствовали на интервале времени с 5 по 7 сентября, но их разделить не представляется возможным из-за интерференционных эффектов в возмущенном солнеч-

ном ветре [2]. В среднем, опережение предиктора составило более суток.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мощные корональные выбросы массы произошли 4, 6, 10 сентября 2017 г. С учетом большой скорости распространения КВМ в гелиосфере, можно было ожидать возмущение магнитосферы через 1–3 сут после их эрупции. С использования метод фликкер-шумовой спектроскопии по данным МГ УРАГАН, был выявлен предиктор КВМ, на сутки опередивший появление возмущения в околоземном пространстве, направленное в сторону Земли.

Работа выполнена на уникальной научной установке НЕВОД при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Программа повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ, проект 02.а03.21.0005) и РФФИ (грант № 16-05-0997).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang H., Yurchyshyn V., Liu C. et al. // Res. Notes AAS. 2018. V. 2. № 1. Art. no. 8.
2. Shen C., Xu M., Wang Y. et al. // Astrophys. J. 2018. V. 861. № 1. P. 28.
3. Tassev Y., Velinov P.I.Y., Tomova D. et al. // Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci. 2017. V. 70. № 10. P. 1437.
4. Барбашина Н.С., Кокоулина Р.П., Компаниец К.Г. и др. // ПТЭ. 2008. № 2. С. 26; Barbashina N.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2008. V. 51. P. 180.
5. Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al. // Adv. Space Res. 2015. V. 56. № 12. P. 2693.
6. Тимашев С.Ф. // Фликкер-шумовая спектроскопия. Информация в хаотических сигналах. М.: Физматлит, 2007. 248 с.
7. Borog V.V., Ivanov I.O., Kryanev A.V. et al. // Phys. Proc. 2015. V. 74. P. 336.
8. Borog V.V., Dmitrieva A.N., Kovylyayeva A.A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. Art. no. 012050.
9. <http://sidc.oma.be/cactus/>.
10. <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/>.
11. <http://iswa.ccmc.gsfc.nasa.gov>.