

Физика космических лучей

Редактор тематического выпуска
доктор физ.-мат наук **А. Д. Панов**

УДК 524.1

МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ НАЗЕМНЫХ ДЕТЕКТОРОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2024 г. В. В. Борог¹, *, А. Н. Дмитриева¹, Ю. Н. Мишутина¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

*E-mail: vvborog@mephi.ru

Поступила в редакцию 24.05.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Для дистанционной идентификации процессов мощной солнечной активности в форме корональных выбросов массы, направленных в сторону Земли, разработана методика фликкер-шумовой спектроскопии. Представлены результаты анализа геоэффективных событий (класса выше $G1$) по данным международной сети нейтронных мониторов и многонаправленного мюонного годоскопа УРАГАН, которые указывают на появление предвестников (с опережением в пределах 1–2 сут) приближения корональных выбросов массы к орбите Земли.

DOI: 10.31857/S0367676524020236, EDN: RQSPNA

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее мощные возмущения космической погоды обусловлены корональными выбросами солнечной массы (КВМ). Информация о приближении коронального выброса, распространяющегося в межпланетном поле (МКВМ), поступает от спутника АСЕ за 30–40 мин до его встречи с Землей. Это время является слишком малым для принятия практических защитных решений. В настоящее время развит ряд косвенных методов для получения более ранних указаний на основе различных физических эффектов, например: по топологии магнитных полей в активных областях Солнца [1, 2], радиоизлучению из МКВМ [3,4], кратковременной вариации потока космических лучей (КЛ), пересекающих область возмущенного электромагнитного поля (ЭМП) МКВМ [5], измерению вариаций КЛ методом глобальной съемки [6], анизотропии в матричных данных потока атмосферных мюонов [7]. Радиоизлучение и высокоэнергичные КЛ проходят все расстояние во внутренней гелиосфере достаточно быстро, в то время как МКВМ достигает орбиты Земли за 1–3 сут, в зависимости от скорости плазмы. Опережение по времени оказывается значительным. Однако возникающие эффекты составляют малую величину и зашумлены вследствие ограниченной статистической точности измерений и случайных локальных процессов.

В данной работе анализируются временные ряды $N(t)$ различных вторичных КЛ, достигающих поверхности Земли. Для этого вычисляются соответствующие ряды той же продолжительности фактора нестационарности $C(t)$ по методике

фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС) [8, 9]. Такая методика оказывается информативной для изучения динамических процессов в различных открытых системах [8], к числу которых относится распространение КЛ в хаотических ЭМП. При этом для выявления предвестников не требуется каких-либо функций-анализаторов. Использование синхронных данных $N(t)$ мировой сети нейтронных мониторов [10] и многонаправленного мюонного годоскопа (МГ) УРАГАН позволяет увеличить чувствительность обнаружения предвестников.

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ КВМ

При анализе временных рядов числа частиц космических лучей $N(t)$ вычисляется фактор нестационарности $C(t_k)$ для любого момента времени t_k , усредненный на небольшом временном окне $[t_k, t_k+T]$ с помощью переходных структурных функций $Q_k(t_k)$ и $P_k(t_k)$ [9]:

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

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

$$C(t_k) = 2 \cdot \frac{Q_k - P_k}{Q_k + P_k} \cdot \frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta Q}{Q} \cdot \frac{\Delta T}{T}. \quad (3)$$

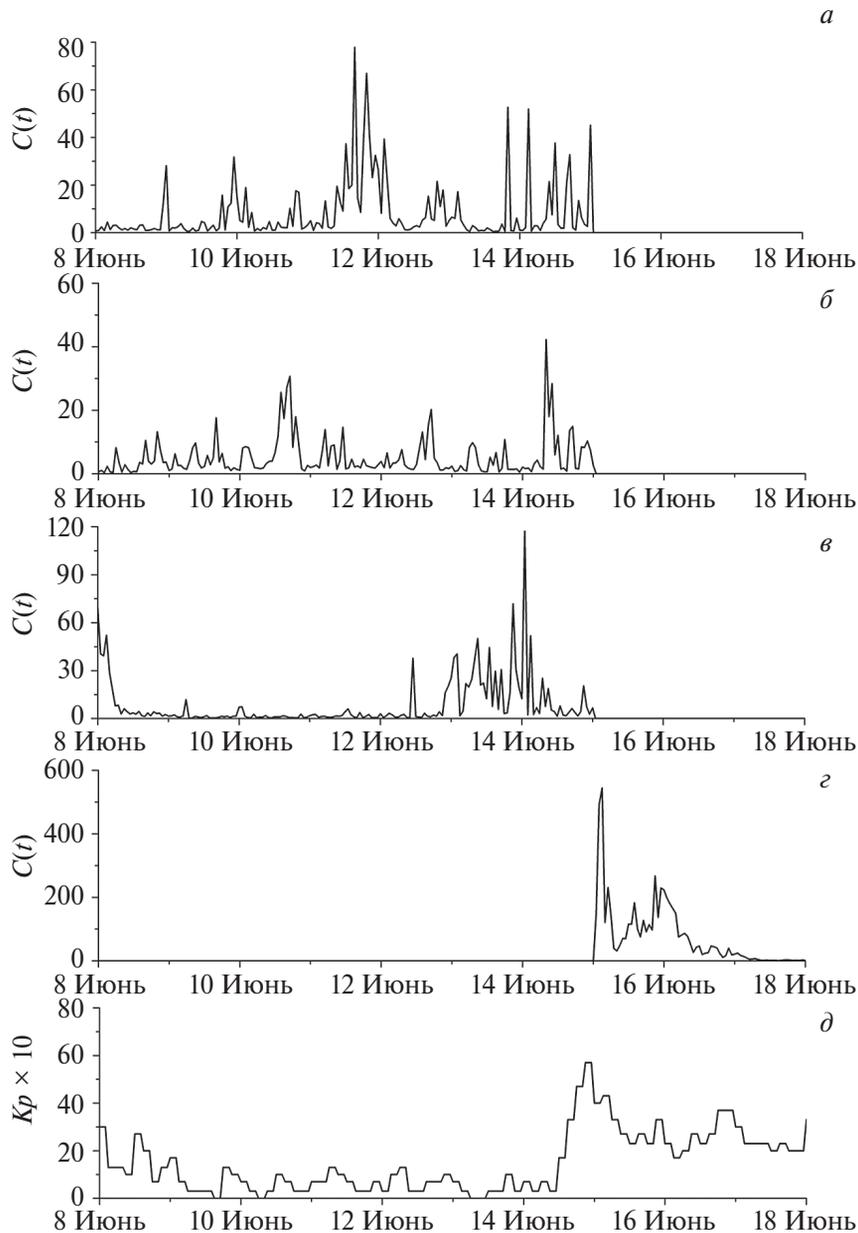


Рис. 1. Анализ события 14.06.2008 г. Суммарные ряды фактора нестационарности $C(t)$ для НМ разных континентов (усл. ед.): для европейских (LMKS, MOSC) (а), азиатских (AATB, NANM) (б), американских (MXCO, CALG) (в), сумма по всем НМ (г), значения индекса Kp (д). Данные (а, б, в) показаны на интервале 08–14 июня в качестве предикторов. Данные (г) соответствуют появлению «всплесков» после предиктора (15–17 июня) во время форбуш-эффекта. Ось абсцисс – отрезок времени 08–18 июня 2008 г.

t_k – текущее время, где $k = 1, 2, 3, \dots, \alpha \leq 0.5$ – максимальная величина сдвига по интервалу времени при вычислении корреляций; ΔT – шаг сдвига интервала усреднения T по всему исследуемому временному ряду; τ – параметр временной задержки.

Величины $C(t_k)$ должны меняться от малых значений, там, где вариации имеют регулярный или случайный характер в спокойном межпланетном

пространстве, до больших величин в моменты пересечения области турбулентной плазмы МКВМ, где происходит взаимодействие в случайных ЭМП с повышенной напряженностью. Наибольшие всплески $C(t_k)$ происходят в точках перестройки величин ряда $N(t)$. Для улучшения отношения «сигнал/шум» в ряду $C(t_k)$ величины $Q_k(t_k)$ и $P_k(t_k)$ рассчитываются два раза на различных интервалах T , отличающихся

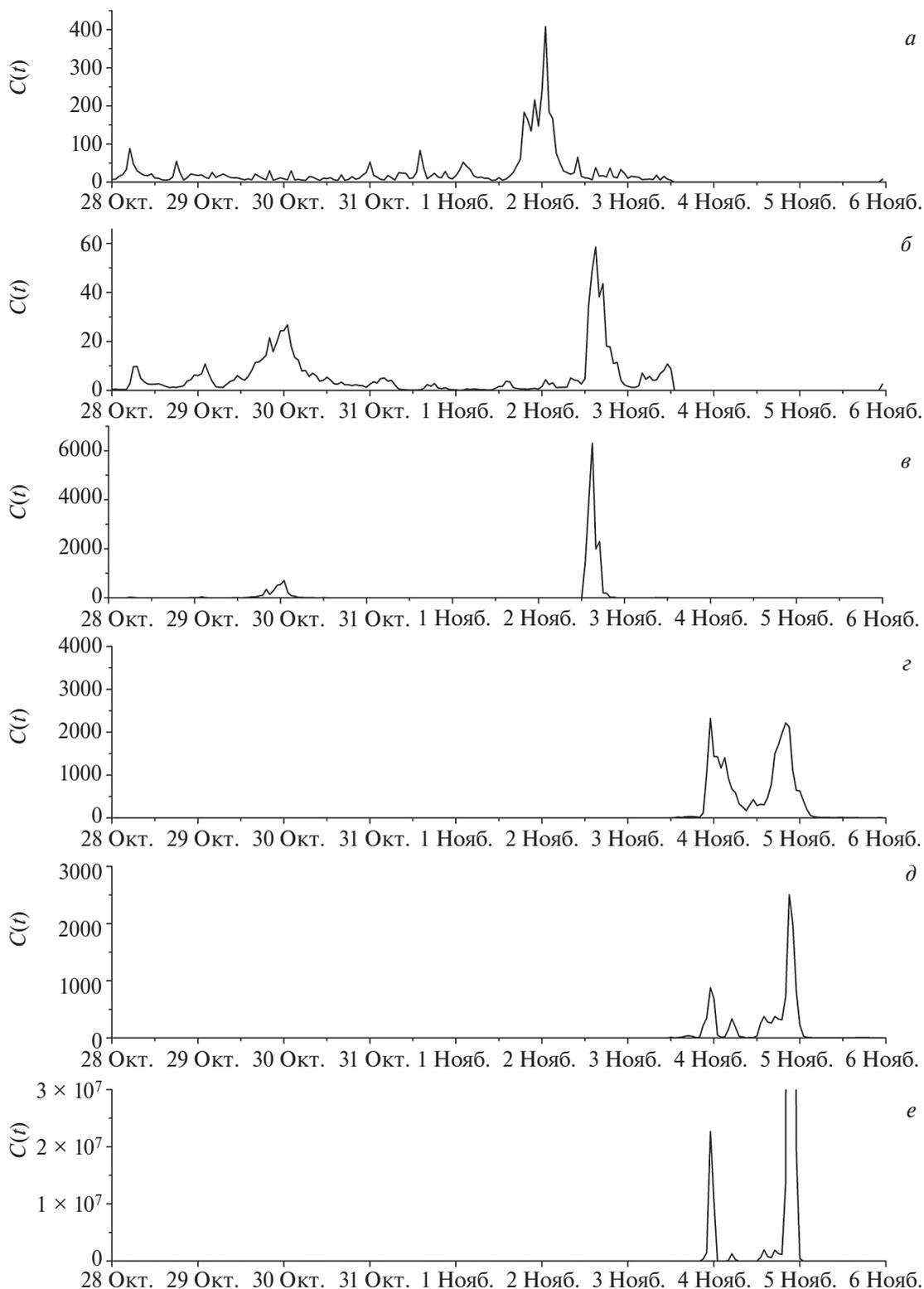


Рис. 2. Анализ события 04.11.2021 г.: почленная сумма $C(t)$ семи рядов НМ (CALM, JUNG1, LMKS, AATB, YKTK, MXCO, NEWK) (а), ряды $C(t)$ для суммы и произведения трех «кольцевых» рядов годоскопа УРАГАН (усл. ед.) (б, в). Данные (а, б, в) показаны на интервале 28 октября – 03 ноября в качестве предикторов. Данные (г, д, е) соответствуют появлению «всплесков» после предиктора 03–05 ноября во время форбуш-эффекта. Ось абсцисс – отрезок времени 28 октября – 05 ноября 2021 г.

на 10–20%. Затем полученные временные ряды $C_1(t_k)$ и $C_2(t_k)$ преобразуются к виду $C(t_k) = C_1(t_k) \cdot C_2(t_k)$. При этом учитывается тот факт, что положение возникающего сигнала при определенном значении времени t не должно зависеть от выбора величины T в некоторых пределах. Процедура является дополнительной фильтрацией случайных шумов. Практически достаточно провести одно повторное вычисление. Такая модификация методики фликкер-шумовой спектроскопии [8] позволяет существенно уменьшить случайные шумовые «всплески» значений $C(t_k)$ [9].

АНАЛИЗ СОБЫТИЙ БОЛЬШОЙ ГЕОЭФФЕКТИВНОСТИ

Для анализа используются временные ряды мировой сети нейтронных мониторов [10] и матричные данные мюонного годоскопа УРАГАН, просуммированные по азимутальному углу (в пределах 360°) и объединенные в пять временных рядов, дифференциально по зенитному углу. Границы углов выбраны в диапазонах: 0–17, 17–26, 26–34, 34–44, 44–90 градусов, чтобы обеспечить примерно одинаковую статистическую точность в каждом ряду. Это так называемые «кольцевые ряды» мюонного годоскопа. Точность отдельных часовых отсчетов составляет около 0.1%.

Апробация проведена путем анализа вариаций КЛ для четырех геоэффективных событий (выше класса $G1$). Для уменьшения влияния фоновых геофизических эффектов на вариации КЛ выбирались события с предшествующими периодами спокойного Солнца, при условии, что геофизический фон на протяжении 3–5 суток перед форбуш-эффектом оставался низким. К рассмотрению принимались интервалы времени порядка месяца, когда одновременно работало по несколько НМ на разных континентах, с порогом обрезания не меньше 1 ГВ и без пропусков во временных рядах.

Для проверки методики проведена обработка семи рядов $N(t)$ сети НМ в период времени с 01 по 30 июня 2008 г. На этом отрезке 14 июня зарегистрирована

геомагнитная буря класса $G1$. Наземные НМ размещены на разных континентах: в Европе (LMKS, MOSC), в Азии (AATB, NANM) и в Америке (MXCO, CALG). Для рядов $N(t)$ с поправкой на давление были вычислены значения $C(t)$. Видно (рис. 1а, 1б и 1в), что для всех НМ возникли «всплески» в рядах $C(t)$ в течение 11–14 июня, которые опережали (рис. 1в) в среднем на 2 дня появления МКВМ на орбите Земли. Положение предикторов от отдельных НМ немного сдвинуто во времени из-за вращения Земли. Большой «всплеск» значений $C(t)$ 15–16 июня совпадает с регистрацией форбуш-эффекта (рис. 1з). Следует отметить, что геофизический фон (индекс Kp) оставался на низком уровне на всем предшествующем интервале времени, вплоть до начала геомагнитной бури.

В другом событии, произошедшем 04.11.2021, зарегистрирована буря SSC класса $G3$. Проведен совместный анализ по данным сети НМ и «кольцевым» рядам годоскопа УРАГАН. Для обработки использовались данные семи НМ тех же трех континентов (CALM, JUNG1, LMKC, AATB, YKTK, MXCO, NEWK) и несколько «кольцевых» рядов. При вычислениях $C(t)$ для отдельных установок также получен суммарный ряд $C(t)$ для всех указанных НМ. На рис. 2 приведены результаты совместного анализа. Сигналы-предикторы $C(t)$ являются практически в одно время в рядах потока КЛ на установках разного типа (рис. 2а и 2б), как в сети НМ, так и в матричных данных мюонного годоскопа. «Кольцевые» ряды мюонного годоскопа наблюдались одновременно, поэтому к ним применена дополнительная процедура фильтрации путем перемножения отдельных рядов фактора нестационарности $C(t)$, что дополнительно улучшает соотношение «сигнал/шум» (рис. 2в). Небольшой сдвиг предикторов возможно обусловлен разным характером дрейфа КЛ в период распространения через область МКВМ, поскольку их эффективная энергия для НМ и МГ значительно различается. Большие «всплески» значений $C(t)$ 04–06 ноября (рис. 2г и 2д) совпадают с регистрацией форбуш-эффекта. Опережение «всплесков»-предикторов $C(t)$ составляет более суток. Из рисунков видно,

Таблица 1. Список обработанных событий, зарегистрированных мировой сетью НМ и многонаправленным МГ.

Дата	Номер из списка [11]	G	$\langle Ap \rangle$	Δt , сутки	Детекторы для анализа
15.07.2000	3	5	164	2	НМ (7)
08.09.2017	17	4	106	1	НМ (8)+МГ (4)
04.11.2021	44	3	72	1	МГ (3)+НМ (7)
14.06.2008	-	1	100	2	НМ (6)

Примечание: G – класс магнитной бури, $\langle Ap \rangle$ – средний индекс возмущения магнитного поля, Δt – опережение предиктора, НМ (7) – предиктор получен по данным 7 детекторов сети НМ, МГ (4) – результат получен по четырем «кольцевым» рядам МГ и т.д. Знак «+» соответствует совместному использованию рядов НМ и МГ.

что фон случайных «всплесков» (по критерию «сигнал/шум») оказывается низким.

Таким же образом обработаны еще несколько мощных МКВМ [11], представленных в табл. 1. Видно, что предикторы составляют 1–2 сут, что значительно опережает информацию о геомагнитных возмущениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика фликкер-шумовой спектроскопии дистанционной идентификации динамических процессов во внутренней гелиосфере, связанных с мощной солнечной активностью в виде КВМ.

Применение отдельной многонаправленной установки типа мюонный годоскоп для идентификации геоэффективных возмущений эквивалентно системе нейтронных мониторов, расположенных в разных точках Земли.

Пробный анализ показал, что для событий класса $G1$ – $G5$ практически всегда наблюдаются предикторы, с опережением в несколько суток до проявления МКВМ у орбиты Земли.

Работа выполнена в НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ при поддержке программы «Приоритет 2030».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shen F., Shen C., Xu M. et al. // Rev. Mod. Plasma Phys. 2022. V. 6. P. 8.
2. Platov A.G., Abramov-Maximo V.E., Borovik V.N. et al. // Geomagn. Aeronomy. 2018. V. 58. P. 1087.
3. Фридман В.М., Шейнер О.А., Тихомиров Ю.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70. № 10. С. 1487; Fridman V.M., Sheiner O.A., Tikhomirov Yu.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2006. V. 70. No. 10. P. 1703.
4. Слемзин В.А., Горяев Ф.Ф., Родькин Д.Г. и др. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 10. С. 1; Slemzin V.A., Goryaev F.F., D.G. Rodkin D.G. et al. // Plasma Phys. Report. 2019. V. 83. P. 889.
5. Астапов И.И., Ампилогов Н.В., Барбашина Н.С. и др. // Тр. XVI Всеросс. конф. по солнечно-физике (Санкт-Петербург, 2012). С. 423.
6. Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Гололобов П.Ю. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 219; Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Gololobov P.Y. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 200.
7. Яшин И.И., Астапов И.И., Барбашина Н.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 631; Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 572.
8. Тимашев С.Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. М.: Физматлит, 2007. 248 с.
9. Борог В.В., Ампилогов Н.В., Дмитриева А.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 216; Borog V.V., Ampilogov N.V., Dmitrieva A.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 197.
10. <https://www01.nmdb.eu>.
11. <https://www.spaceweatherlive.com/en/auroral-activity/top-50-geomagnetic-storms.html>.

Space weather monitoring with a system of ground-based cosmic ray detectors

V. V. Borog¹*, A. N. Dmitrieva¹, Y. N. Mishutina¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia
*e-mail: vvbrog@mephi.ru

For remote identification of the processes of powerful solar activity in the form of CME directed towards the Earth, a technique of flicker noise spectroscopy has been developed. The results of the analysis of geo-effective events ($> G1$) are presented according to the data of the international network of neutron monitors and the multidirectional muon hodoscope URAGAN, which indicate the appearance of predictors (with an outstrip of 1–2 days) of the CME approach to the Earth's orbit.