**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ
ПОТОКА МЮОНОВ, РЕГИСТРИРУЕМОГО В ГОДОСКОПИЧЕ-
СКОМ РЕЖИМЕ, ВО ВРЕМЯ МОЩНЫХ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ
ГЕЛИОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ 2017 ГОДА**

Осетрова Н.В., Астапов И.И., Мельникова И.А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

**INVESTIGATION OF THE LOCAL ANISOTROPY OF MUON FLUX
DETECTED IN HODOSCOPIC MODE DURING POWERFUL
GEOEFFECTIVE HELIOSPHERIC DISTURBANCES 2017**

Osetrova N.V., Astapov I.I., Melnikova I.A.

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia*

Active processes on the Sun are the main source of disturbances in the interplanetary space. Today, monitoring and forecasting of dangerous phenomena in the near-Earth space and the Earth's atmosphere are necessary. Most of such researches are based on data from satellites. They are placed at the Earth orbit and provide information about disturbances shortly before their impact on the magnetosphere. The use of cosmic rays for such studies allows us to obtain information about the processes occurring in the heliosphere much earlier, because they move at a speeds close to the speed of light.

The muon hodoscope URAGAN registers cosmic ray muon flux at the Earth's surface simultaneously from various directions. This makes it possible to study the anisotropy of the muon flux caused by heliospheric phenomena, such as the passage of coronal mass ejections (CME) in the interplanetary space. In this paper an analysis of data MH URAGAN is presented. The response of the muon hodoscope for geoeffective coronal mass ejections that occurred in 2017 is investigated. The selection of CME is carried out using the CACTus database, which is formed on the basis of the analysis of the data of the LASCO C2/C3 coronagraphs (SOHO) and COR2 (STEREO A, B).

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-327-330

Основным источником возмущений в межпланетном пространстве являются активные процессы на Солнце, изучение которых необходимо для мониторинга и своевременного прогнозирования последующего воздействия опасных явлений на околоземное пространство и атмосферу Земли. Большинство исследований сегодня основано на данных, получаемых со спутниковых аппаратов. Применение космических лучей для подобных исследований также позволяет получать информацию о процессах, происходящих в гелиосфере.

Частицы первичных космических лучей, попадая в атмосферу, взаимодействуют с ядрами атомов воздуха и генерируют вторичную компоненту, основную часть которой на поверхности Земли составляют мюоны. Они с хорошей точностью сохраняют направление движения первичных

частиц, что позволяет проводить исследования пространственно-угловых вариаций космических лучей (КЛ) в околоземном пространстве. Наибольшее влияние в периоды повышенной солнечной активности на потоки КЛ в межпланетном пространстве оказывают корональные выбросы массы (КВМ). В работе рассматриваются КВМ, произошедшие в 2017 году.

Мюонный годоскоп (МГ) УРАГАН [1] регистрирует поток мюонов космических лучей на поверхности Земли одновременно с различных направлений, что дает возможность изучать анизотропию потока мюонов [2], вызванную гелиосферными явлениями, в том числе, прохождением корональных выбросов масс в межпланетном пространстве. Годоскоп является широкоапертурным координатно-трековым детектором, способным регистрировать мюоны в широком диапазоне зенитных углов ($0-80^\circ$) и используется для изучения характеристик пространственно-угловых вариаций потока мюонов. МГ состоит из четырех супермодулей общей площадью $\sim 46 \text{ м}^2$ и обладает высокой пространственной ($\sim 1 \text{ см}$) и угловой ($\sim 1^\circ$) точностью. Каждый супермодуль состоит из восьми слоев стримерных трубок, оснащенных двухкоординатной системой внешних считывающих полосок-стрипов. Зарегистрированные мюоны с реконструированным направлением прилета записываются в двумерную угловую матрицу, которая представляет собой снимок верхней полусферы в потоке мюонов с экспозицией в 1 минуту.

Для описания углового распределения потока мюонов используется вектор локальной анизотропии $\vec{A}$, который представляет собой сумму единичных векторов, имеющих направления реконструированных треков отдельных мюонов, нормированную на их число. Вектор локальной анизотропии указывает среднее направление прихода мюонов, которое близко к вертикальному. В качестве характеристики его отклонений от среднего направления используется длина горизонтальной проекции r_h вектора относительной анизотропии, представляющего собой разницу между текущим значением вектора и средним вектором анизотропии, вычисленным за длительный промежуток времени: $\vec{r} = \vec{A} - \langle \vec{A} \rangle$.

Отбор корональных выбросов масс производился из базы данных SACTus [3], которая формируется на основе анализа данных коронографов LASCO C2/C3 (космический аппарат SOHO) и COR2 (космические аппараты STEREO A, B). Рассматривались КВМ, произошедшие в 2017 году, скорость которых более 500 км/с. Светлыми точками на графиках (рисунки 1 и 2) обозначены отобранные корональные выбросы. Если время начала выбросов отличалось менее чем на 12 часов, то такие выбросы объединялись в группы и рассматривались как единые события – черные точки на рисунках. Для каждой группы событий рассчитано среднее время вылета и средняя скорость [4].

Каждая серия событий была классифицирована как геоэффективная или негеоэффективная. Под геоэффективными событиями понимают такие

события, которые оказали непосредственное влияние на радиационную, геомагнитную и электромагнитную обстановку в околоземном пространстве [5].

Рис. 1.

На рисунке 1 представлены временные ряды параметров межпланетного магнитного поля – скорости солнечного ветра и индукции, а также индексов геомагнитной активности – Kp и Dst . Горизонтальными линиями для V_{sw} и B обозначен порог значений, превышающий среднее на σ , для индексов Kp и Dst – порог, обозначающий магнитную бурю. На первом графике нанесены КВМ и группы КВМ с соответствующими скоростями. Видно, что группы 5 и 6 сентября 2017 г. оказали влияние на магнитосферу Земли – скорость солнечного ветра возросла до 821 км/с, а индукция ММП до 27 нТл. Значения индексов $Kp = 8$, $Dst = -150$ соответствуют очень сильной магнитной буре. Группа 12 сентября также классифицирована как геоэффективная: $V_{sw} = 694$ км/с, $B = 20$ нТл, $Kp = 5$, $Dst = -50$. События 10 и 17 сентября непосредственного влияния на магнитосферу не оказали и были классифицированы как негеоэффективные.

На рисунке 2 представлены временные ряды параметров локальной анизотропии потока мюонов за сентябрь 2017 года, выраженные в единицах среднеквадратичных отклонений [2]. Сверху вниз: r_s – проекция локальной анизотропии на направление географического юга, r_E – проекция локальной анизотропии на направление географического востока, r_h – проекция вектора относительной анизотропии на горизонтальную плоскость. Горизонтальными линиями на каждом графике отмечены значения 3σ . Из рисунка видно, что наибольший отклик в мюонном годоскопе дали геоэффективные события: все параметры значительно превышают установленные пороги. 6 сентября в 09:00 значение r_s/σ_{rs} достигло 4, а 08 сентября в 04:00 $r_s/\sigma_{rs} = -6.5$. Кроме того, 13 сентября в 05:00 $r_s/\sigma_{rs} = -5$.

Рис. 2.

Аналогично, для значений параметра r_E/σ_{r_E} максимальное значение зарегистрировано 8 сентября в 07:00 и составляет 5, кроме того, в 02:00 $r_E/\sigma_{r_E} = -4.4$. 12 сентября в 22:00 $r_E/\sigma_{r_E} = -4.3$. Таким образом, определен отклик МГ УРАГАН на геоэффективные события 5, 6 и 10 сентября. Во временном ряду r_h/σ_{r_h} отклик годоскопа более заметен. Максимальные значения – отклики на события 5, 6, 10 сентября – зафиксированы 8.09 в 04:00 $r_h/\sigma_{r_h} = 10.3$ и 13.09 в 05:00 $r_h/\sigma_{r_h} = 7.4$, при этом первый отклик – 6 сентября в 9:00 $r_h/\sigma_{r_h} = 6.4$.

Аналогичным методом проанализированы все отобранные события, произошедшие в 2017 году. Рассмотрено 55 групп корональных выбросов массы, 36 из них классифицированы как геоэффективные. Аномально активным для периода снижения солнечной активности являлся сентябрь 2017 году, в котором произошедшие КВМ вызвали сильную магнитную бурю на Земле. В 2017 году отклик годоскопа УРАГАН на КВМ зафиксирован в 56% случаев, а для геоэффективных события составил 58%.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре НЕВОД НИЯУ МИФИ при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 8-32-00161 мол_а).

Литература

1. Н.С. Барбашина и др. // ПТЭ. 2008. № 2. С. 26.
2. I.I. Astapov et al. // Advances in Space Research. V. 56. I. 12. P. 2713.
3. База данных CACTus: <http://www.sidc.be/cactus/>
4. I.I. Astapov et al. // 25th ECRS. 2016. Conf. 16-09-04.3 arXiv: 1701.00070
5. И.Н. Мягкова и др. //Астрономический вестник. 2013. Т. 47 (2), с. 141.