ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ПОТОКА МЮОНОВ ПО ДАННЫМ МЮОННОГО ГОДОСКОПА УРАГАН НА РАЗНЫХ ФАЗАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

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

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

STUDY OF VARIATIONS OF MUON FLUX ACCORDING TO MUON HODOSCOPE URAGAN DATA AT DIFFERENT PHASES OF SOLAR ACTIVITY

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

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

The paper presents the results of the analysis of data of the muon hodoscope URAGAN over the period from 2007 to 2017, which covers both the minimum and maximum of solar activity. The OMNI2 database was used for selection geomagnetic disturbance intervals. The correlation dependences between the parameters of perturbations of the heliosphere and the magnetosphere with the characteristics of the local anisotropy of the muon flux at different phases of solar activity are given.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-279-282

Распространение потока космических лучей в гелиосфере зависит от характеристик потока солнечной плазмы. Регистрация потока мюонов на поверхности Земли одновременно с различных направлений мюонным годоскопом (МГ) УРАГАН [1] позволяет проводить пространственно-угловые измерения модуляций космических лучей в околоземном пространстве и изучать динамику изменения потока мюонов в широком диапазоне зенитных и азимутальных углов, что, в свою очередь, дает возможность изучать анизотропию потока мюонов, вызванную возмущениями межпланетного магнитного поля. В работе анализируются корреляции между параметрами возмущений гелиосферы и магнитосферы с характеристиками локальной анизотропии потока мюонов по данным мюонного годоскопа на разных фазах солнечной активности за период с 2007 по 2017 гг.

При анализе угловых вариаций потока мюонов рассматриваются изменения, связанные с деформацией углового распределения и, соответственно, матриц-мюонографий, которые дают информацию о локальной анизотропии космических лучей. Локальная анизотропия углового распределения потока мюонов может быть описана с помощью вектора – суммы единичных векторов реконструированных треков отдельных мюонов, нормированной на их число. Вектор локальной анизотропии указывает среднее направление прихода мюонов за выбранный промежуток времени.

Проекции вектора анизотропии в локальной системе координат рассчитываются по формулам [2]:

$$A_X = \frac{1}{N} \sum_{\theta} \sum_{\varphi} M_a \cdot \cos \varphi \cdot \sin \theta, \quad A_Y = \frac{1}{N} \sum_{\theta} \sum_{\varphi} M_a \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta, \quad A_Z = \frac{1}{N^{cor}} \sum_{\theta} \sum_{\varphi} M_a^{cor} \cdot \cos \theta,$$

$$A_S = A_X \cos \varphi_0 + A_Y \sin \varphi_0, \quad A_E = -A_X \sin \varphi_0 + A_Y \cos \varphi_0, \quad A = \sqrt{A_S^2 + A_E^2 + A_Z^2}$$

Для параметров локальной анизотропии r_S , r_E , r_h в зависимости от года наблюдения проявляются вариации различного уровня, что можно связать с изменением солнечной активности. На рисунке 1 представлены среднегодовые отклонения темпа счета и проекций вектора локальной анизотропии в течение суток для 2007–2017 гг.: а – темп счета; б – A_Z ; в – A_S ; г – A_E . Первые результаты анализа долговременных вариаций потока мюонов по данным МГ УРАГАН за 2007-2011 гг. представлены в работе [3].

Рис. 1.

Из рисунка 1 видно, что суточные изменения темпа счета и A_Z подобны и синфазны в отличие от их годовых изменений, а характер суточных изменений A_E и A_S сильно отличается от вариаций темпа счета и A_Z . В 2009 году, соответствующему минимуму солнечной активности, отмечается уменьшение амплитуды суточных отклонений.

На рисунке 2 представлены корреляции среднегодовых суточных отклонений проекции A_S и A_E вектора локальной анизотропии (а) и среднегодовые отклонения проекций вектора локальной анизотропии r_h в течение суток за 2007–2017 гг. (б). Видно, что стабильная кольцеобразная форма корреляций среднегодовых суточных отклонений проекций A_S и A_E вектора локальной анизотропии сохраняется на протяжении 2007–2017 гг.

Для исследования связи параметров потока мюонов с параметрами межпланетной среды и околоземного пространства были проанализирова-

ны корреляции между характеристиками солнечной активности и различными характеристиками пространственно-углового распределения мюонов.

Рис. 2

На рисунке 3 сопоставлены усреднённые помесячно значения проекций локальной анизотропии A_S и A_E с количеством солнечных пятен в 2007–2017 гг. (а) и помесячные среднеквадратичные отклонения проекций вектора локальной анизотропии с солнечной активностью в 2007–2017 гг. (б).

Рис. 3.

Из рисунка 3(а) видно, что прямой корреляции не наблюдается. Поэтому для дальнейшего анализа были рассмотрены не средние значения параметров анизотропии, а их среднеквадратичные отклонения. Как видно на рисунке 3(б), между среднеквадратичными отклонениями и количеством солнечных пятен прослеживается хорошая взаимосвязь, однако корреляция условна, так как формируется в результате различных процессов, включая возмущения солнечного ветра.

На рисунке 4(а) представлены корреляционные зависимости среднемесячных значений индукции межпланетного магнитного поля и скорости солнечного ветра со среднемесячными значениями параметрами r_h за 2007–2017 гг. Между r_h и B_t наблюдается прямая связь, коэффициент корреляции $R \approx 0.80$. Между среднемесячными значениями r_h и V_{sw} корреляция значи-

тельно меньше ($R \approx 0.33$). Также были построены корреляционные зависимости среднемесячных значений индукции ММП со среднемесячными значениями параметров $\sigma(r_s)$ и $\sigma(r_s)$ за 2007-2017 гг., коэффициенты корреляции соответственно $R \approx 0.81$ и 0.82 (рис.4б).

Рис. 4.

В ходе дальнейшего анализа были рассмотрены корреляции между среднемесячными значениями параметра r_h и индексами геомагнитной активности (Kp и Dst) и выявлено, что корреляции слабые (коэффициенты корреляций соответственно ≈ 0.66 и ≈ 0.49), но при этом достаточно выражены.

В результате проведенного анализа долговременных вариаций потока мюонов космических лучей, зарегистрированных мюонным годоскопом УРАГАН на поверхности Земли за 11-летний период работы установки с 2007 по 2017 гг., показано, что: в годы максимума солнечной активности суточные вариации локальной анизотропии потока мюонов космических лучей увеличиваются более чем в 2 раза по сравнению с периодом минимума активности Солнца; выявленные корреляции среднегодовых суточных отклонений проекций вектора локальной анизотропии A_S и A_E имеют циклическую форму. В результате сопоставления параметров локальной анизотропии потока мюонов с уровнем солнечной активности выявлены корреляции между горизонтальной проекцией вектора относительной анизотропии r_h и индукцией магнитного поля B_t (коэффициент корреляции ~ 0.80), а также Kp и Dst -индексами (коэффициенты корреляции ~ 0.66 и ~ 0.49 соответственно).

Регистрация мюонов в годоскопическом режиме позволяет с помощью одной установки исследовать не только интенсивность потока космических лучей, но и их локальную анизотропию, чувствительную к изменениям в гелиосфере, что позволяет проводить исследования возмущений в межпланетном пространстве с поверхности Земли.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре НЕВОД НИЯУ МИФИ при поддержке РФФИ (№18-32-00161 мол_a).

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. В.В. Шутенко и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 5. С. 611.