СПЕКТРОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ 29 ОКТЯБРЯ 2003 г.

В. К. Коротков

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук.

По данным регистрации нейтронных кратностей в нейтронном мониторе ст. "Магадан" спектрографическим методом определены параметры спектра вариаций жесткости космических лучей и вариации жесткости геомагнитного обрезания для Форбуш - понижения 29.10.03. Результаты анализа показывают увеличение показателя спектра при его представлении в степенном виде и понижение жесткости геомагнитного обрезания.

Данные и метод анализа.

Связь между относительными вариациями $\delta I_k / I_k$ компоненты космических лучей (КЛ) типа k, в которые введена поправка на вариации атмосферного происхождения, с вариациями жесткости геомагнитного обрезания δR_C и относительными вариациями спектра жесткости $\delta D(R)/D(R)$ частиц КЛ как функции их жесткости R записывается в виде [1]

$$\delta I_k / I_k = -W_k(R_C)\delta R_C + \int_{R_C}^{\infty} [\delta D(R)/D(R)] W_k(R) dR , \qquad (1)$$

где $W_{ki}(R)$ - функции связи между первичными и регистрируемыми вариациями КЛ. В качестве компонент вторичных КЛ I_k в этой работе, как и в [2,3], используются нейтронные кратности, регистрируемые нейтронным монитором, в которые введена поправка на вариации атмосферного происхождения и эффект случайных совпадений. Функции связи $W_k(R)$ можно определить из экспедиционных измерений широтного хода нейтронных кратностей [1]

$$W_k(R_C) = -\frac{1}{I_k(R_C)} \frac{\partial I_k(R_C)}{\partial R_C} .$$

Если принять широтный ход для кратностей в том же виде, что и для интенсивности [4] $I_k(R) = I_k^0(1 - \exp(-\alpha_k R^{1-\beta_k}))$, коэффициенты связи принимают вид

$$W_k(R) = \alpha_k (\beta_k - 1) \exp(-\alpha_k R^{1-\beta_k}) / (1 - \exp(-\alpha_k R^{1-\beta_k})) . \qquad (2)$$

Параметры α_k и β_k, полученные в экспедиционных измерениях на НИС «Академик Курчатов, приведены в [2,3]. Спектр вариаций в простейшем виде принимается в степенной форме [4]

$$\delta D(R)/d(R) = BR^{-\gamma} \qquad (3)$$

Три неизвестных параметра B, γ и δR_C можно определить решением системы (1) для первых трех кратностей, которая после подстановки (2, 3) в (1) принимает вид

$$\delta I_k / I_k = -W_k(R_C)\delta R_C + B \int_{R_C}^{\infty} R^{-\gamma} W_k(R) dR, \quad k = 1,2,3 . \qquad (4)$$

После исключения δR_C и B получаем уравнение для определения γ $G = F(\gamma)$, где

$$G=\frac{\frac{\delta I_1}{I_1}W_2(R_C)-\frac{\delta I_2}{I_2}W_1(R_C)}{\frac{\delta I_2}{I_2}W_3(R_C)-\frac{\delta I_3}{I_3}W_2(R_C)}\ ,\qquad F(\gamma)=\frac{F_1(\gamma)W_2(R_C)-F_2(\gamma)W_1(R_C)}{F_2(\gamma)W_3(R_C)-F_3(\gamma)W_2(R_C)}$$

и введены обозначения $F_k(\gamma)=\frac{\alpha_k(\beta_k-1)}{1-\exp(-\alpha_k R_C^{1-\beta_k})}\int_{R_C}^{\infty}R^{-\gamma-\beta_k}\exp(-\alpha_k R^{1-\beta_k})dR$.

Для определения γ можно использовать метод последовательных приближений. Правую часть для G разложим в ряд Тейлора до первого порядка включительно в точке начального приближения $\gamma=\gamma^{(0)}$

$$G=F^{(0)}+\left(\frac{dF}{d\gamma}\right)^{(0)}\Delta\gamma^{(0)}$$

и после подстановки (6) получаем выражение для определения $\Delta\gamma^{(0)}$

$$\Delta\gamma^{(0)}=\frac{(G-F^{(0)})(W_3(R_C)F_2^{(0)}-W_2(R_C)F_3^{(0)})}{W_2(\gamma)\left(\frac{dF_1}{d\gamma}\right)^{(0)}-W_1(R_C)\left(\frac{dF_2}{d\gamma}\right)^{(0)}-F^{(0)}\left(W_3(R_C)\left(\frac{dF_2}{d\gamma}\right)^{(0)}-W_2(R_C)\left(\frac{dF_3}{d\gamma}\right)^{(0)}\right)},$$

где $\left(\frac{dF_k}{d\gamma}\right)^{(0)}=-\frac{\alpha_k(\beta_k-1)}{1-\exp(-\alpha_k R_C^{1-\beta_k})}\int_{R_C}^{\infty}R^{-\gamma^{(0)}-\beta_k}\ln R\exp(-\alpha_k R^{1-\beta_{ki}})dR$,

а последующие приближения определяются как $\gamma^{(n+1)}=\gamma^{(n)}+\Delta\gamma^{(n)}$, $n=0,1,2,...$. После определения γ легко определяются δR_C и B:

$$\delta R_C=\frac{\frac{\delta I_1}{I_1}F_2-\frac{\delta I_2}{I_2}F_1}{F_1W_2(R_C)-F_2W_1(R_C)},\qquad B=\frac{\frac{\delta I_1}{I_1}W_2(R_C)-\frac{\delta I_2}{I_2}W_1(R_C)}{F_1W_2(R_C)-F_2W_1(R_C)}.$$

Результаты анализа и их обсуждение.

На рис. 1 изображен временной ход интенсивности КЛ I, регистрируемой нейтронным монитором, а также отношения нейтронных кратностей к интенсивности I_k/I для первых трех кратностей $k=1,2,3$ с сентября по декабрь 2003 года. Временной ход отношений I_k/I для различных кратностей различен, т.е. первичные и регистрируемые вариации нейтронных кратностей имеют различные коэффициенты связи, что и дает возможность использования данных по вариациям нейтронных кратностей в спектрографическом методе. На рис. 1 изображен также временной ход средних нейтронных кратностей, рассчитанных различным образом: $Ko=I/I_0$ - по отношению данных по интенсивности к числу ядерных реакций в нейтронном мониторе I_0, определяемых, как и в [2,3] по данным регистрации интенсивности с «мертвым» временем 3600 мксек; KI и KR, рассчитанных как $K=\sum_{k=1}^{\infty}kI_k/\sum_{k=1}^{\infty}I_k$ по данным регистрации нейтронных кратностей I_k с компенсацией и без компенсации случайных совпадений соответственно. Значение средней кратности растет с увеличением средней энергии падающих на нейтронный монитор частиц, поэтому увеличение средней кратности во время Форбуш-понижения означает, что энергетический спектр КЛ становится более жестким. Это показывают графики для Ko и KI. Однако, для средней кратности без компенсации случайных совпадений KR её временной ход просто повторяет временной ход интенсивности, т. е. без коррекции

данных по кратностям на эффект случайных совпадений возможна неправильная физическая интерпретация данных.

Для определения вариации обычно используется разность между последующим и предыдущим значениями $\delta I_k = I_k^n - I_k^{n-1}$. В этом варианте относительные вариации определятся как

$$\delta I_k / I_k = (I_k^n - I_k^{n-1}) / I_k^{n-1} \qquad (5)$$

На рис. 1(а) и 2(а) изображены $\delta R_C, B, \gamma$, рассчитанные вышеизложенным спектрографическим методом по определенным согласно (5) вариациям. Здесь необходимо отметить, что при малых по величине вариациях, находящихся в пределах статистической погрешности измерений, система уравнений (4) плохо обусловлена. И только при достаточно больших значениях δI_k решение системы (4) имеет физический смысл. Рис. 2(а) показывает, что в момент начала Форбуш-понижения 29 октября в 6.00 UT возрастает показатель степенного спектра вариаций γ и понижается жесткость геомагнитного обрезания $R_C + \delta R_C$, а также понижается B, что продолжается до конца суток. До 29-го октября и после 10-го ноября до конца года из-за малых значений $\delta I_k / I_k$ спектрографический метод не дает надежных результатов.

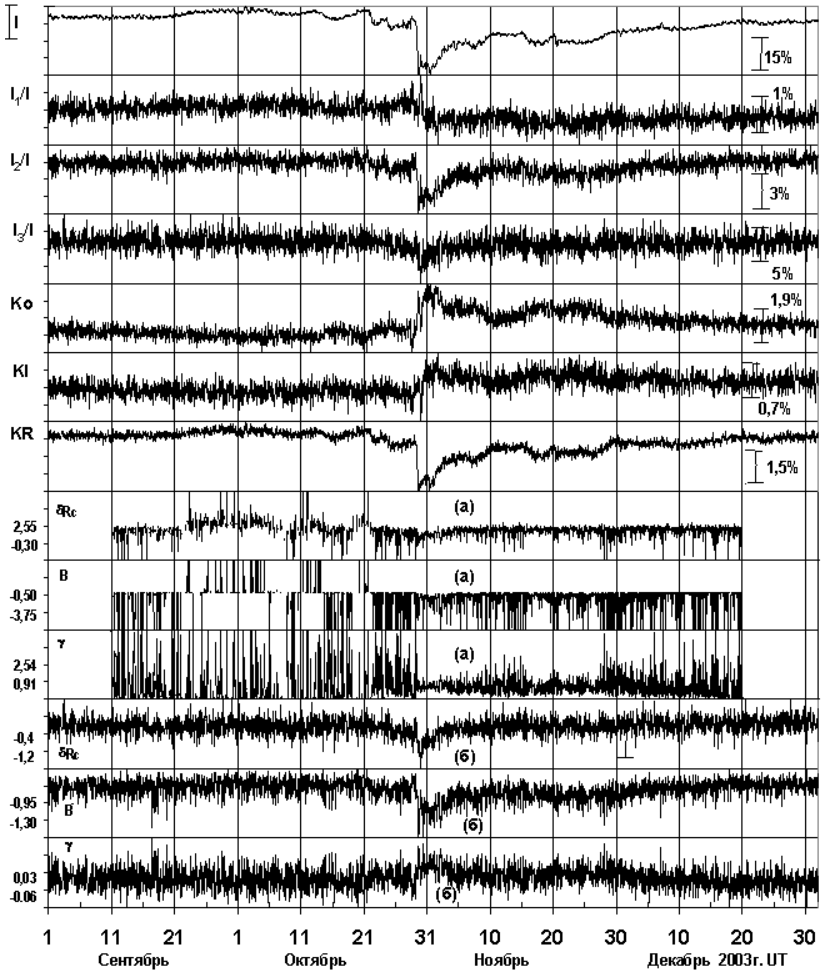

Рис.1. *Временной ход интенсивности космических лучей нейтронного монитора ст. «Магадан» - ;и и первых трех кратностей I_k / I ; средней кратности о , с компенсацией KI и без компенсации ; вариаций жесткости геомагнитного обрезания δ и параметров B и γ рассчитанных (а) - по вариациям кратностей, определяемых выражением (5) или (6) и (б) – определенных выражением (7).*

Для просмотра временного хода параметров удобнее использовать вариации относительно среднего значения $\bar{I}_k$, принятого для данного пункта наблюдения с жесткостью геомагнитного обрезания R_C и рассчитанного в спокойный период перед Форбуш - понижением. В этом случае $\delta I_k / I_k$ в (4) следует определить как

$$\delta I_k / I = (I_k - \bar{I}_k) / \bar{I}_k . \qquad (6)$$

Но и для этого способа определения вариаций решение системы (4) имеет физический смысл также при достаточно больших отклонениях I_k от их средних значений, т. е. только непосредственно во время Форбуш - понижения. Расчет $\delta R_C, B, \gamma$ с определенными согласно (6) вариациями дает практически те же результаты, что и для варианта (5). Поэтому для возможности решения системы (4) и определения вариаций $\delta R_C, B, \gamma$ по всему анализируемому периоду здесь использовано удвоенное среднее значение и вариации определены как

$$\delta I_k / I = (I_k - 2\bar{I}_k)/(2\bar{I}_k), \qquad (7)$$

что для данного Форбуш - понижения дает левую часть системы (4) достаточно удаленную от нуля и возможность получения решения, имеющего физический смысл. Рассчитанные таким образом $\delta R_C, B, \gamma$ изображены на рис. 1(б) и 2(б). Временной ход показателя спектра вариаций γ показывает его увеличение с момента начала Форбуш - понижения, которое заканчивается в начале ноября. Затем следует понижение до некоторого промежуточного значения, не изменяющегося в течение 10-30 ноября, и в декабре происходит восстановление до начального значения. Временной ход δR_C происходит в противофазе с изменением γ. Хотя такой способ определения вариаций является в некоторой степени искусственным, тем не менее, он позволяет определять относительные изменения $\delta R_C, B, \gamma$.

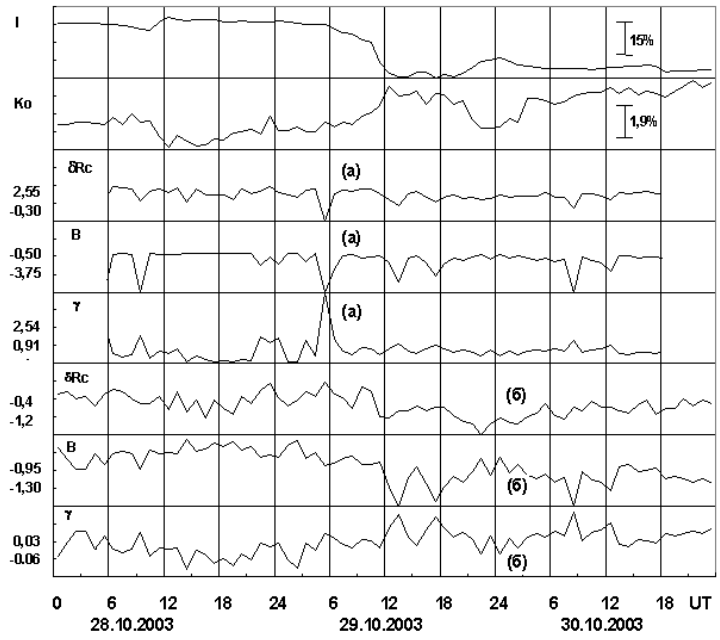

***Рис.2**. Обозначения те же, что и на рис.1.*

Основные выводы.

Таким образом, использование варианта определения вариаций нейтронных кратностей согласно (7) дает возможность использовать спектрографический метод для расчета и анализа вариаций жесткости геомагнитного обрезания и параметров спектра вариаций жесткости частиц космических лучей для любого периода наблюдения, в том числе и во время Форбуш - понижений.

Список литературы

1. *Дорман Л. И.* // Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975, с. 150.
2. *Коротков В. К.* // Изв. РАН. Сер. физ. Proc. 25th RCRC.1999. Т. 63. № 8. С. 1666.
3. *Korotkov V. K., Eroshenko E. A., Yanke V.* // Proc. 26th ICRC. Salt Lake City. 1999. V. 7. P. 305.
4. *Дорман Л. И., Шхалахов Г. Ш.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1972. Т. 36. № 11. С. 2420.