

Новый метод оценки абсолютного потока и энергетического спектра солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов

Г. Ф. Крымский¹⁾, В. Г. Григорьев, С. А. Стародубцев

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отд. РАН, 677980 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 29 июля 2008 г.

Приводится новый метод оценки абсолютного потока солнечных космических лучей по данным измерений отдельно взятого нейтронного монитора. Учитывая наличие и доступ к данным мировой сети станций космических лучей, метод позволяет определить энергетический спектр на изотропной фазе вспышки. Суть метода заключается в том, что определяется эффективный импульс (или энергия), при котором поток частиц, рассчитанный по темпу счета нейтронного монитора, существенно не меняется при малых изменениях показателя степенного спектра. Сравнение проведенных расчетов с прямыми измерениями на космических аппаратах и результатами расчетов других авторов, выполненных по измерениям на сети нейтронных мониторов, для последнего события наземного возрастания солнечных космических лучей 13 декабря 2006г., показывает их удовлетворительное согласие.

PACS: 96.50.S-, 96.50.Vg

В научной литературе описаны различные методы определения потока и энергетического спектра солнечных космических лучей (КЛ) во время событий наземных возрастаний (в англоязычной литературе – Ground Level Enhancement – GLE). За все время наблюдений (с 1942 г.) их число сравнительно невелико – 70. В научной литературе принято стандартное обозначение событий наземных возрастаний солнечных КЛ, определяемое номером события. Примечательно, что амплитуда событий меняется в широких пределах и составляет от единиц до тысяч процентов от уровня фона галактических КЛ.

В большинстве случаев событий GLE имеют весьма сложный профиль и для своего описания, включая получение энергетических спектров, требуют одновременного знания многих параметров межпланетной среды и геомагнитного поля, расчетов траекторий КЛ в магнитосфере Земли, согласно моделям при различных уровнях возмущенности, а также большого объема сложных, с большими временными затратами численных расчетов (см. [1] и ссылки там). Это обстоятельство весьма затрудняет изучение событий GLE по наземным измерениям.

В данной работе приводится простой и оригинальный метод оценки абсолютного потока и, следовательно, спектра солнечных КЛ по данным мировой сети нейтронных мониторов. Суть предлагаемого ниже метода заключается в том, что определяется эф-

фективный импульс (или энергия), при котором поток частиц, рассчитанный по темпу счета нейтронного монитора на изотропной фазе события GLE, не меняется при малых изменениях показателя степенного спектра солнечных КЛ.

Установленные на Земле детекторы КЛ имеют различный статистический счет, поэтому все измерения интенсивности КЛ каким-либо прибором (как правило, нейтронным монитором) удобно определять в относительных единицах (например, как обычно и делается, в процентах). При этом за единицу принимается интенсивность КЛ, наблюдаемая в спокойный период, для которого известен абсолютный спектр галактических КЛ $J_0(p)$. В данной работе все величины приводятся в зависимости от импульса частиц КЛ p , но это не принципиально – можно использовать также энергию E или жесткость частиц R .

В этом случае нормированную кратность генерации вторичных частиц в атмосфере Земли $m(p)$ для прибора целесообразно определять следующим образом:

$$\int_{p_{\min}}^{\infty} m(p) J_0(p) dp = 1, \quad (1)$$

откуда размерность величины кратности есть: $[m(p)] = [\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{частиц}]$. В случае, если прибор регистрирует солнечные КЛ со спектром $J_s(p)$, то эффект возрастания интенсивности

$$\delta N = \int_{p_{\min}}^{\infty} m(p) J_s(p) dp \quad (2)$$

¹⁾e-mail: krymsky@ikfia.ysn.ru

будет выражен в относительных единицах (процентах), как это и имеет место в реальном эксперименте.

Все вычисления могут быть выполнены лишь тогда, когда известен вид зависимости: $m(p) = \text{const} \times f(p)$, то есть функция распределения КЛ $f(p)$ известна с точностью до некоторого множителя. При этом зависимость кратности от импульса $m(p)$ можно получить, используя коэффициенты связи прибора [2]:

$$W(p) = p_0^{-1} (p_0/p)^2 e^{-p_0/p}, \quad (3)$$

где для минимума солнечной активности $p_0 = 9.4 \text{ ГэВ}/c$ [3], здесь c – скорость света.

Дифференциальный спектр галактических КЛ также может быть представлен в известном виде: $J_0(p) = A e^{-p_1/p} (p_1/p)^\gamma$. Усредненный спектр галактических КЛ, измеренный разными группами авторов, представлен в работе [4]. Аппроксимация этих результатов указанной выше формулой приводит к следующим значениям, входящих в нее параметров: постоянная $A = 365$ частиц/($\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot (\text{ГэВ}/c)$), $p_1 = 4 \text{ ГэВ}/c$, $\gamma = 2.77$. В таком случае выражение для кратности можно переписать в виде

$$m(p) = W(p)/J_0(p) = B e^{-p_2/p} (p/p_3)^{\gamma_1}, \quad (4)$$

где $\gamma_1 = \gamma - 2 = 0.77$, $B = 1/A p_0 = 2.9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}/\text{частиц}$, $p_2 = p_0 - p_1 = 5.4 \text{ ГэВ}/c$, $p_3 = p_1 (p_1/p_0)^{2/\gamma_1} = 0.43 \text{ ГэВ}/c$.

В случае регистрации солнечных КЛ во время событий GLE со спектром $J_s(p) \sim p^{-\gamma_s}$ удобно определить эффективный импульс частиц p_{eff} так, чтобы абсолютный поток частиц $J_s(p_{\text{eff}})$, рассчитываемый по темпу счета нейтронного монитора, существенно не менялся при малых изменениях показателя γ_s . (При этом следует иметь в виду, что, зная поток солнечных КЛ на разных станциях КЛ с различными порогами геомагнитного обрезания в определенный момент времени, когда их интенсивность изотропна, мы автоматически получаем энергетический спектр события GLE в это время.)

Это требование можно выразить формулой

$$\frac{\partial}{\partial \gamma_s} (\delta N) = \frac{\partial}{\partial \gamma_s} \int_{p_{\text{min}}}^{\infty} m(p) (p/p_{\text{eff}})^{-\gamma_s} dp = 0. \quad (5)$$

В этом случае для эффективного импульса p_{eff} можно написать:

$$\ln P_{\text{eff}} = \int_{p_{\text{min}}}^{\infty} m(p) p^{-\gamma_s} \ln p dp / \int_{p_{\text{min}}}^{\infty} m(p) p^{-\gamma_s} dp. \quad (6)$$

Тогда поток солнечных частиц при $p = p_{\text{eff}}$, определяемый по показаниям некоторого монитора δN , будет равен $J_s(p_{\text{eff}}) = k \cdot \delta N$, где множитель k находится из уравнения

$$\delta N = \int_{p_{\text{min}}}^{\infty} m(p) J_s(p) dp = k^{-1} \cdot J_s(p_{\text{eff}}). \quad (7)$$

Тогда для множителя k можно написать: $k = p_{\text{eff}}^{-\gamma_s} / \int_{p_{\text{min}}}^{\infty} m(p) p^{-\gamma_s} dp$. Если теперь зафиксировать эффективный импульс частиц p_{eff} и менять наклон спектра, то и изменения множителя k при малых отклонениях от среднего значения γ_s будут малы. Проведенные расчеты показывают, что это действительно так, а из этого следует естественный вывод, что соответствующий выбор эффективного импульса обеспечивает необходимую устойчивость коэффициента k .

Подавляющее большинство событий GLE происходит в окрестности максимума 11-летнего цикла солнечной активности. Но событие GLE70, произошедшее 13 декабря 2006 г. в минимуме солнечной активности, не ожидалось, поэтому оно получило собственное имя – maverick – “бродяга”, данное американскими учеными из университета Бартоля (США) (<http://www.bartol.edu>), первыми официально зарегистрировавшими это событие в реальном времени при выполнении международной научной программы Spaceship Earth, в которую входила и Россия.

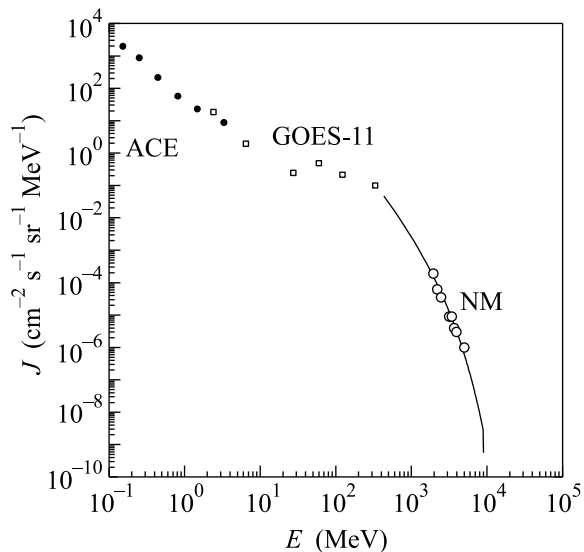
По данным мировой сети станций КЛ, событие началось в 02.50 UT, оно характеризовалось весьма большой анизотропией на фазе роста потока частиц и амплитудой $\sim 100\%$ [1].

Отметим, что при изучении этого события нами используются 1-мин данные 8-ми станций мировой сети нейтронных мониторов, на которых зарегистрирована вспышка – Апатиты, Якутск, Кингстон, Киль, Москва, Новосибирск, Ларк, Иркутск – с порогами геомагнитного обрезания R_c от 0.6 до 3.7 ГВ. При расчетах абсолютных потоков солнечных КЛ на этих станциях принималось во внимание, что в данном методе не учитывается влияние анизотропии в событиях вспышек солнечных КЛ. С другой стороны, известно, что в течение примерно 1 ч после достижения максимума, регистрируемый поток солнечных КЛ становится в достаточной степени изотропным за счет рассеяния на неоднородностях межпланетного магнитного поля, что в значительной степени определяет рамки применимости метода.

Расчеты показывают, что эффективные импульсы P_{eff} для выбранного набора станций при $\gamma_s \approx 6$

есть 1.8, 2.0, 2.3, 3.0, 3.2, 3.5, 4.7 и 4.8 ГэВ/с, соответственно.

Рисунок иллюстрирует энергетический спектр солнечных КЛ 13 декабря 2006 г. в 03.25 UT по прямым измерениям на космических аппаратах ACE и GOES-11, данным мировой сети нейтронных мониторов [1], а также результаты расчетов согласно предложенному выше методу. Как следует из рисунка, результаты расчетов вполне удовлетворительны.



Энергетический спектр солнечных КЛ 13 декабря 2006 г. в 03.25 UT по прямым измерениям на космических аппаратах ACE (черные кружки) и GOES-11 (светлые квадратики), а также по данным мировой сети нейтронных мониторов (сплошная линия – расчеты [1], светлые кружки – результаты расчетов согласно предложенному методу)

Так как статистическая точность нейтронных мониторов составляет величину $\sim 1\%$, то ошибка измерений из-за малости здесь не приводится. Очевидно, что результаты прямых измерений и расчетов в широкой области энергий хорошо согласуются меж-

ду собой. Следовательно, данный метод правильно описывает изучаемое явление наземного возрастания солнечных КЛ.

В заключение еще раз отметим, что суть предложенного метода заключается в определении эффективного импульса, при котором рассчитанный абсолютный поток солнечных частиц в пределах апертуры монитора не меняется при малых изменениях показателя степенного спектра. Сравнение полученных и имеющихся в литературе результатов [1] показывает применимость данного метода для исследования событий GLE. Учет в дальнейшем дополнительных факторов, влияющих на наблюдаемое распределение частиц, позволит получить более точные параметры потоков солнечных КЛ и проследить их динамику во время событий GLE. Учитывая, что в настоящее время имеется возможность оперативного получения данных мировой сети станций КЛ, а также простоту метода, можно надеяться, что он уже в ближайшее время может успешно применяться для изучения событий GLE в режиме реального времени применительно к вопросам космической погоды.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты # 06-02-96008, # 07-02-00972 и # 07-02-01405), Программы РАН "Нейтронная физика" а также гранта Президента РФ для поддержки ведущей научной школы # НШ-3968.2008.2.

1. Э. В. Вашенюк, Ю. В. Балабин, Б. Б. Гвоздевский, А. И. Шур, *Геомагнетизм и аэрономия* **48**, 157 (2008).
2. Л. И. Дорман, *Вариации космических лучей*, М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1957.
3. G. F. Krymsky, P. A. Krivoshapkin, S. K. Gerasimova et al., In Proc. 28th ICRC, Tsukuba. **7/7**, 3985 (2003).
4. M. Hareyama, T. Shibata, and the Runjob Collaboration, *J. of Modern Physics A* **20**, 6769 (2005).