

УДК 524.1-352

КОРРЕКТИРОВКА НЕЙТРОННЫХ КРАТНОСТЕЙ В НЕЙТРОННОМ МОНИТОРЕ

© 2012 г. В. К. Коротков

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
п. Паратунка, (Камчатский край)*

E-mail: kor_orkfi@mail.ru

Поступила в редакцию 11.05.2010 г.

После доработки 18.10.2010 г.

Представлен способ регистрации нейтронных кратностей в нейтронном мониторе с автоматической коррекцией на эффект совпадений. Выполнен анализ изменений в энергетическом спектре космических лучей по вариациям средней нейтронной кратности для событий в октябре 2003 г., января 2005 г. и декабря 2006 г. Показано, что без коррекций на эффект совпадений нейтронные кратности практически неприменимы, и могут приводить к обратному результату.

1. ВВЕДЕНИЕ

Нейтронные кратности в нейтронном мониторе связаны с энергетическим спектром первичных космических лучей. Энергетическая чувствительность нейтронных кратностей смещается в сторону больших энергий с увеличением величин кратности, что дает возможность по вариациям интенсивности различных кратностей наблюдать вариации первичных космических лучей [Дорман, 1975]. Из причин, которые препятствуют непосредственному использованию данных по кратным нейтронам и приводят к неправильной интерпретации их вариаций как отражение вариаций энергетического спектра космических лучей, основным является эффект случайных совпадений [Nobles, 1969]. Величина кратности определяется по количеству нейтронов, зарегистрированных в течение времени сбора некоторой конечной длительности. Вследствие этого возможны случаи, когда в течение времени сбора в нейтронном мониторе происходят два и более взаимодействия падающих на монитор частиц с ядрами мишени. В результате регистрируется ложная суммарная кратность, а также теряются величины совпавших кратностей. Это приводит к перераспределению кратностей и неверной интерпретации их вариаций и, соответственно, вариаций энергетического спектра космических лучей. Кроме того, имеет место перераспределение кратностей, связанное с выходом части кратных нейтронов за пределы времени сбора. Также имеют место потери кратных нейтронов, обусловленные разрешающим временем детектирующего устройства, но это эффекты более низкого порядка. Если необходим их учет, то это требует отдельного рассмотрения. Аналитическая поправка на эффект случайных совпадений возможна только

для первых нескольких кратностей из-за быстро возрастающей с ростом кратности сложности поправочных уравнений. Также необходимо точно знать временное распределение кратных нейтронов в нейтронном мониторе, которое известно лишь приближенно и, в свою очередь, искажено эффектом случайных совпадений.

2. РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРОННЫХ КРАТНОСТЕЙ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ЭФФЕКТА СОВПАДЕНИЙ

Предложенный способ компенсации эффекта совпадений может быть использован только с нейтронным монитором, состоящим из нескольких идентичных секций, каждая из которых представляет собой отдельный независимый нейтронный монитор [Коротков, 1980]. Вероятность попадания частицы в каждую секцию нейтронного монитора одна и та же, так как секции идентичны, и поток космических лучей равномерно падает на каждую секцию. Так, для двухсекционного нейтронного монитора, если в одной из секций произошло взаимодействие, вероятность того, что в течение времени сбора в этой же секции произойдет второе взаимодействие, равно вероятности того, что второе взаимодействие произойдет в другой секции. Следовательно, если пренебречь совпадениями более высоких порядков, трехкратными, четырехкратными и т.д., то по числу случаев регистрации суммарной кратности в двух разных секциях можно определить число случаев регистрации ложной кратности, образованной двумя совпавшими кратностями в одной секции. Для обоих случаев для любых сочетаний величин кратностей число зарегистрированных кратностей в течение интервала времени реги-

страции одно и то же в пределах статистической погрешности. Аналогично, число потерянных совпавших кратностей при их совпадении в одной секции равно числу зарегистрированных кратностей в каждой секции отдельно при их совпадении в разных секциях для каждого сочетания величин совпавших кратностей. Таким образом, хотя зафиксировать факт регистрации ложной кратности и определить величины совпавших кратностей при их совпадении в одной секции невозможно, имеется возможность компенсировать эти случаи совпадений. Для этого необходимо организовать регистрацию кратностей при их совпадении в разных секциях так, чтобы с их помощью осуществлялась компенсация, как ложных кратностей, так и потерь совпавших кратностей. В данном случае, необходимо вести регистрацию количества кратностей со знаком “плюс” (т.е. суммировать число случаев регистрации каждой величины кратности) в случаях, если в течение времени сбора нейтроны зарегистрированы только в одной секции. А для компенсации ложных кратностей, образованных двойными совпадениями в одной секции, необходимо в случаях, когда в течение времени сбора нейтроны зарегистрированы в двух секциях, регистрировать суммарную кратность, равную сумме нейтронов, зарегистрированных в течение времени сбора в двух секциях со знаком “минус”. Иначе говоря, на каждый такой случай уменьшать на единицу число случаев регистрации соответствующей кратности. Чтобы компенсировать потери совпавших кратностей при их совпадении в одной секции, необходимо регистрировать величины кратностей отдельно в каждой секции при появлении нейтронов в течение времени сбора в двух секциях, и их количество регистрировать со знаком “плюс” с умножением на два. Удвоение необходимо для того, чтобы зарегистрировать как количество кратностей отдельно в каждой секции, так и компенсировать потери совпавших в одной секции кратностей. Таким образом, за некоторый интервал времени в пределах статистической погрешности регистрации будут получены данные по кратностям с компенсацией двукратных совпадений. Очевидно, что с двухсекционным нейтронным монитором возможна компенсация только эффекта двукратных совпадений.

Для нейтронного монитора, состоящего из N идентичных секций, при компенсации совпадений необходимо учитывать все возможные случаи распределения совпавших кратностей по секциям нейтронного монитора. Введем обозначение $[(s_1)(s_2)...(s_n)]$, которое символически обозначает распределение s совпавших в течение времени сбора кратностей по n секциям нейтронного монитора. s_1 — количество кратностей, зарегистрированное в одной из n секций, s_2 — в одной из

остальных $(n - 1)$ секций; \dots ; s_n — в последней секции; $s = s_1 + s_2 + \dots + s_n$. Порядок s_1, s_2, \dots, s_n произволен, необходимо только определить количество совпавших кратностей в каждой секции. Возможно любое распределение совпавших кратностей по секциям нейтронного монитора, каждое из которых равновероятно для любого сочетания величин совпавших кратностей. В общем случае число распределений s кратностей по N секциям определяется, как N^s . Для компенсации каждого вида совпадений необходимо знать количество всех возможных распределений каждого вида по N секциям. Количество распределений вида $[(s_1)(s_2)...(s_n)]$ по n секциям при условии, что в одной секции окажется s_1 , в одной из остальных — s_2, \dots , в последней — s_n кратностей равно $\frac{s!}{s_1!s_2!\dots s_n!}$. Эти n

секций могут быть выбраны A_N^n способами из N секций ($A_N^n = N(N-1)(N-2)\dots(N-n+1)$ — число размещений из n элементов по N) и количество распределений определится как $\frac{s!}{s_1!s_2!\dots s_n!} A_N^n$. В тех случаях, когда некоторые из значений s_i ($i = 1, 2, \dots, n$) равны друг другу, необходимо исключить их перестановки, так как они учтены в количестве распределений A_N^n , поэтому следует записать

$$P_N [(s_1)(s_2)\dots(s_n)] = \frac{s!}{s_1!s_2!\dots s_n n_1!n_2!\dots n_r!} A_N^n, \quad (1)$$

где $P_N [(s_1)(s_2)\dots(s_n)]$ — количество распределений вида $[(s_1)(s_2)\dots(s_n)]$ в N секциях; n_j — количество секций, в которых разместилось одинаковое количество кратностей ($j = 1, 2, \dots, r$), т.е. количество одинаковых значений s_i в последовательности s_1, s_2, \dots, s_n ; r — количество групп с одинаковым значением s_i . В качестве примера приведем случай распределений 10-ти кратностей ($s = 10$) по 6-ти секциям ($n = 6$) из 15 ($N = 15$) при условии, что в одной из секций совпало три кратности ($s_1 = 3$), в двух из остальных по две кратности ($s_1 = s_2 = 2$), в оставшихся трех по одной кратности ($s_4 = s_5 = s_6 = 1$). Иначе говоря, первая группа секций, в которой разместились три кратности, состоит из одной секции ($n_1 = 1$), вторая — по две кратности, состоит из двух секций ($n_2 = 2$) и третья — по одной кратности, состоит из трех секций ($n_3 = 3$). Количество таких распределений кратностей запишется в виде

$$P_{15} [(3)(2)(2)(1)(1)] = \frac{10!}{3!2!2!1!1!1!} \frac{A_{15}^{10}}{1!2!3!}.$$

Используя выражение (1), можно установить, как следует организовать регистрацию кратностей, чтобы осуществить компенсацию эффекта

совпадений. Если в течение времени сбора нейтроны зарегистрированы только в одной секции, то в количество зарегистрированных в таком случае кратностей входят как истинные кратности, так и ложные кратности, образованные совпадением нескольких кратностей. Совпадения кратностей в одной секции можно компенсировать последующей регистрацией таких же кратностей в нескольких секциях, по одной в каждой, на основе того, что каждое распределение кратностей по секциям является равновероятным. При этом следует учесть наличие определенного количества возможных равновероятных распределений при совпадении кратностей в количестве секций меньше, чем количество совпавших кратностей.

Для двойных совпадений схема регистрации следующая. При регистрации нейтронов в течение времени сбора только в одной секции количество кратностей, регистрируют со знаком “плюс” (отдельно для каждой величины кратности). Поэтому для компенсации ложных кратностей, образованных совпадением двух кратностей в одной секции, необходимо следующее. В случаях, когда в течение времени сбора нейтроны зарегистрированы в двух секциях из N , регистрировать суммарную кратность в этих двух секциях со знаком “минус”. При этом регистрацию необходимо вести с предварительным делением количества таких кратностей на соответствующий коэффициент. В данном случае этот коэффициент равен отношению количества распределений при совпадении двух кратностей в двух разных секциях $P_N[(1)(1)]$ к количеству распределений при совпадении двух кратностей в одной и той же секции $P_N[(2)]$. Для компенсации потерь двух совпавших кратностей при их совпадении в одной и той же секции необходимо выполнять регистрацию следующим образом. В случаях регистрации нейтронов в течение времени сбора в двух разных секциях регистрировать количество кратностей, зарегистрированных в каждой из этих двух секций, со знаком “плюс” с предварительным делением. Коэффициент деления равен отношению количества кратностей во всех распределениях по одной кратности в двух секциях $2P_N[(1)(1)]$ к полному количеству кратностей во всех распределениях $2N^2$, где N^2 полное количество распределений двух кратностей в обеих секциях.

Введем обозначение D_{Nnm} — коэффициент деления при регистрации кратностей в N — секционном мониторе, в случае, если в течение времени сбора нейтроны зарегистрированы в n секциях из N , и ведется регистрация суммарной кратности в m секциях из n . При этом необходима одновременная регистрация в каждом сочетании m секций из n , количество которых равно $\binom{n}{m}$. Для уже

описанного случая компенсации двукратных совпадений можно записать

$$D_{N21} = \binom{2}{1} P_N [(1)(1)] (2N^2)^{-1} = (N-1)/N,$$

$$D_{N22} = -\binom{2}{2} P_N [(1)(1)] \{P_N [(2)]\}^{-1} = -(N-1).$$

Минус в коэффициенте D_{N22} и далее означает, что регистрацию кратностей следует вести со знаком “минус”. Аналогично записываются коэффициенты деления для любых значений m и n , $1 \leq m \leq n \leq N$. При этом следует учитывать, что при компенсации совпадений s -го порядка уже имеет место их частичная компенсация при компенсации совпадений порядка $< s$.

$$D_{N31} = \binom{3}{1} P_N [(1)(1)(1)] \{3N^3 - P_N [(2)(1)] D_{N21}^{-1}\}^{-1} = (N-2)/N.$$

В фигурных скобках из полного количества кратностей во всех распределениях $3N^3$ вычитается количество уже зарегистрированных случаев регистрации одной кратности в одной секции при совпадении трех кратностей в двух секциях. Эти кратности регистрировались со знаком “плюс” и с делением D_{N21} .

$$P_{N32} = \binom{3}{2} P_N [(1)(1)(1)] \{P_N [(2)(1)] D_{N21}\}^{-1} = -(N-1)(N-2)/N.$$

В этом случае имеет место использование случаев совпадений двух кратностей в одной секции для компенсации потерь совпавших кратностей при двукратных совпадениях, что не допустимо, так как для этой цели необходимо использовать только случаи, когда в каждой секции размещается по одной кратности. Регистрация суммарной кратности в двух секциях из трех во всех их трех сочетаниях со знаком “минус” и коэффициентом деления $(N-2)(N-1)/N$ компенсирует этот случай ложной компенсации.

$$D_{N33} = -\binom{3}{3} P_N [(1)(1)(1)] \{P_N [(2)(1)] D_{N22}^{-1} + P_N [(3)]\}^{-1} = (N-1)(N-2)/2.$$

Для компенсации трехкратных совпадений в одной секции следует использовать случаи, когда нейтроны зарегистрированы в трех секциях ($n=3$) из N секций. При этом следует учитывать, что при компенсации совпадений выполняется регистрация суммарной кратности при совпадении трех кратностей в двух секциях со знаком “минус” и с коэффициентом деления $(N-1)$, т.е. уже имеет место частичная компенсация трехкратных совпадений. Это учтено в D_{N33} первым слагаемым в

фигурных скобках. Смена знака регистрации обусловлена тем, что при компенсации двукратных совпадений имеет место излишняя компенсация трехкратных совпадений. Далее записаны коэффициенты деления для $n = 4, 5$.

$$D_{N41} = \binom{4}{1} P_N [(1)(1)(1)(1)] \{4N^4 - 2P_N [(2)(1)(1)] \times \\ \times D_{N31}^{-1} - P_N [(3)(1)] D_{N21}^{-1}\}^{-1} = (N-3)/N;$$

$$D_{N42} = -\binom{4}{2} P_N [(1)(1)(1)(1)] \{P_N [(2)(1)(1)] \times \\ \times (D_{N31}^{-1} + D_{N32}^{-1}) + 2P_N [(2)(2)] D_{N21}^{-1}\}^{-1} = \\ = -(N-2)(N-3)/N;$$

$$D_{N43} = -\binom{4}{3} P_N [(1)(1)(1)(1)] \{2P_N [(2)(1)(1)] D_{N32}^{-1} + \\ + P_N [(3)(1)] D_{N21}^{-1}\}^{-1} = \\ = (N-1)(N-2)(N-3)/(2N);$$

$$D_{N44} = -\binom{4}{4} P_N [(1)(1)(1)(1)] \{P_N [(2)(1)(1)] D_{N33}^{-1} + \\ + P_N [(2)(2)] D_{N22}^{-1} + P_N [(3)(1)] D_{N22}^{-1} + P_N [(4)]\}^{-1} = \\ = -(N-1)(N-2)(N-3)/6;$$

$$D_{N51} \binom{5}{1} P_N [(1)(1)(1)(1)(1)] \{5N^5 - 3P_N [(2)(1)(1)(1)] \times \\ \times D_{N41}^{-1} - (P_N [(2)(1)(1)] + 2P_N [(3)(1)(1)]) D_{N31}^{-1} - \\ - P_N [(4)(1)] D_{N21}^{-1}\}^{-1} = (N-4)/N;$$

$$D_{N52} = -\binom{5}{2} P_N [(1)(1)(1)(1)(1)] \{P_N [(2)(1)(1)(1)] \times \\ \times (D_{N41}^{-1} + 3D_{N42}^{-1}) + 2P_N [(2)(2)(1)] D_{N31}^{-1} + \\ + P_N [(3)(1)(1)] D_{N32}^{-1} + P_N [(3)(2)] D_{N21}^{-1}\}^{-1} = \\ = -(N-3)(N-4)/N;$$

$$D_{N53} = -\binom{5}{3} P_N [(1)(1)(1)(1)(1)] \{P_N [(2)(1)(1)(1)] \times \\ \times (D_{N43}^{-1} + 3D_{N42}^{-1}) + 2P_N [(2)(2)(1)] D_{N32}^{-1} + \\ + P_N [(3)(1)(1)] D_{N31}^{-1} + P_N [(3)(3)] D_{N21}^{-1}\}^{-1} = \\ = (N-2)(N-3)(N-4)/N;$$

$$D_{N54} = -\binom{5}{4} P_N [(1)(1)(1)(1)(1)] \{3P_N [(2)(1)(1)(1)] \times \\ \times D_{N43}^{-1} + (P_N [(2)(2)(1)] + 2P_N [(3)(1)(1)]) D_{N32}^{-1} + \\ + P_N [(4)(1)] D_{N21}^{-1}\}^{-1} = \\ = -(N-1)(N-2)(N-3)(N-4)/6N;$$

$$D_{N55} = -\binom{5}{5} P_N [(1)(1)(1)(1)(1)] \{P_N [(2)(1)(1)(1)] D_{N44}^{-1} + \\ + (P_N [(2)(2)(1)] + P_N [(3)(1)(1)]) D_{N33}^{-1} + (P_N [(3)(2)] + \\ + P_N [(4)(1)]) D_{N22}^{-1} + P_N [(5)]\}^{-1} = \\ = (N-1)(N-2)(N-3)(N-4)/24.$$

Из выражений для D_{Nnm} следует, что в общем виде, для любых значений N , m и n коэффициент деления определяется выражением

$$D_{Nnm} = (-1)^{m-1} \frac{m}{N} \binom{N-n+m}{m} \quad m \leq n \leq N. \quad (2)$$

Знак в формуле (2) означает, что регистрацию суммарных кратностей с каждого сочетания m секций из n следует вести со знаком “плюс” при нечетном значении m и со знаком “минус” — при четном. Регистрация кратностей в каждом сочетании m секций из N согласно (2) обеспечивает полную идентичность моделирования случаев совпадения кратностей, а именно, моделирует совпадение кратностей с той же вероятностью выхода части кратных нейтронов за пределы времени сбора. Суммирование выражения (2) по всем возможным значениям n и m дает следующую математическую формулу регистрации кратностей [Коротков, 1986]

$$I_k = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^n \frac{(-1)^{m-1} N}{m \binom{N-n+m}{m}} \sum_{\binom{n}{m}} R_{k_1+k_2+\dots+k_m=k}^{(n)}, \quad (3)$$

где $R_{k_1+k_2+\dots+k_m=k}^{(n)}$ — число случаев регистрации суммарной кратности k в m секциях при условии, что нейтроны зарегистрированы в n секциях; $\binom{n}{m}$ под знаком суммы обозначает суммирование по всем возможным сочетаниям m секций, в которых подсчитывается суммарная кратность, из n секций, в которых зарегистрированы нейтроны; I_k — число случаев регистрации кратности k с компенсацией эффекта совпадений до N -го порядка включительно.

Такой принцип компенсации совпадений позволяет выполнить полную компенсацию эффекта случайных совпадений, используя схему регистрации (3) до порядка, определяемого количеством секций нейтронного монитора. На миро-

вой сети станций космических лучей в настоящее время используются нейтронные мониторы, состоящие из нескольких идентичных секций. Начиная с двухсекционного нейтронного монитора ($N \geq 2$) можно использовать для компенсации случайных совпадений схему регистрации (3). Для двухсекционного нейтронного монитора формула (1) принимает вид

$$I_k = R_k^{(1)} - R_{k_1+k_2=k}^{(2)} + 2(R_{k_1=k}^{(2)} + R_{k_2=k}^{(2)}).$$

Для упрощения схемы регистрации можно использовать тот факт, что статистически количество зарегистрированных кратностей в секции, в которой зарегистрирована первая из совпавших кратностей, равна числу случаев с этой же кратностью, когда совпавшая кратность произошла в другой секции, т.е. $R_{k_1=k}^{(2)} = R_{k_2=k}^{(2)}$. Тогда можно записать $I_k = R_k^{(1)} - R_{k_1=k}^{(2)} + 4R_{k_1=k}^{(2)}$. На мировой сети станций космических лучей в основном используются нейтронные мониторы, состоящие из трех секций. Для этого случая для $N = 3$ формула (3) принимает вид

$$I_k = R_k^{(1)} + \frac{3}{2}(R_{k_1=k}^{(2)} + R_{k_2=k}^{(2)}) - \frac{1}{2}R_{k_1+k_2=k}^{(2)} + 3(R_{k_1=k}^{(3)} + R_{k_2=k}^{(3)} + R_{k_3=k}^{(3)}) - \frac{3}{2}(R_{k_1+k_2=k}^{(3)} + R_{k_1+k_3=k}^{(3)} + R_{k_2+k_3=k}^{(3)}) + R_{k_1+k_2+k_3}^{(3)}.$$

Как и для предыдущего случая $N = 2$, также можно считать, что статистически в круглых скобках слагаемые равны друг другу, поэтому можно записать

$$I_k = R_k^{(1)} + 3R_{k_1=k}^{(2)} - \frac{1}{2}R_{k_1+k_2=k}^{(2)} + 9R_{k_1=k}^{(3)} - \frac{9}{2}R_{k_1+k_2=k}^{(3)} + R_{k_1+k_2+k_3}^{(3)}.$$

На станции космических лучей “Магадан” работает трехсекционный нейтронный монитор и ведется регистрация нейтронных кратностей по этой формуле, в которой пренебрегается регистрацией $R_{k_1=k}^{(3)}$ и $R_{k_1+k_2}^{(3)}$:

$$I_k = R_k^{(1)} + 3R_{k_1=k}^{(2)} - \frac{1}{2}R_{k_1+k_2=k}^{(2)} + R_{k_1+k_2+k_3}^{(3)},$$

а т.к. технически проще осуществить деление на три, чем умножение на три, для упрощения схемы регистрации введено дополнительное деление на три

$$I_k/3 = R_k^{(1)}/3 + R_{k_1=k}^{(2)} - R_{k_1+k_2=k}^{(2)}/6 + R_{k_1+k_2+k_3}^{(3)}/3.$$

На некоторых станциях космических лучей мировой сети станций имеются нейтронные монито-

ры, состоящие из четырех секций $N = 4$. В этом случае формула (3) принимает вид

$$I_k = R_k^{(1)} + \frac{4}{3}(R_{k_1=k}^{(2)} + R_{k_2=k}^{(2)}) - \frac{1}{3}R_{k_1+k_2=k}^{(2)} + 2(R_{k_1=k}^{(3)} + R_{k_2=k}^{(3)} + R_{k_3=k}^{(3)}) - \frac{2}{3}(R_{k_1+k_2=k}^{(3)} + R_{k_1+k_3=k}^{(3)} + R_{k_2+k_3=k}^{(3)}) + \frac{1}{3}R_{k_1+k_2+k_3}^{(3)} + 4(R_{k_1=k}^{(4)} + R_{k_2=k}^{(4)} + R_{k_3=k}^{(4)} + R_{k_4=k}^{(4)}) - 2(R_{k_1+k_2=k}^{(4)} + R_{k_1+k_3=k}^{(4)} + R_{k_1+k_4=k}^{(4)} + R_{k_2+k_3=k}^{(4)} + R_{k_2+k_4=k}^{(4)} + R_{k_3+k_4=k}^{(4)}) + \frac{4}{3}(R_{k_1+k_2+k_3=k}^{(4)} + R_{k_1+k_2+k_4=k}^{(4)} + R_{k_1+k_3+k_4=k}^{(4)} + R_{k_2+k_3+k_4=k}^{(4)}) - R_{k_1+k_2+k_3+k_4=k}^{(4)}.$$

3. СРЕДНЯЯ НЕЙТРОННАЯ КРАТНОСТЬ С КОМПЕНСАЦИЕЙ И БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ ЭФФЕКТА СОВПАДЕНИЙ

Средняя нейтронная кратность увеличивается с увеличением средней энергии космических лучей, что дает возможность по временному ходу средней кратности анализировать изменения в энергетическом спектре космических лучей [Kodama and Inoue, 1970]. Средняя нейтронная кратность, рассчитанная по непосредственно регистрируемому данным по кратностям, т.е. без компенсации эффекта совпадений, определяется как

$$\overline{Kr} = \frac{\sum_k k R_k}{\sum_k R_k}, \quad (4)$$

где R_k – число случаев регистрации событий с кратностью k без компенсации эффекта совпадений, и средняя кратность с компенсацией эффекта совпадений

$$\overline{Ki} = \frac{\sum_k k I_k}{\sum_k I_k}, \quad (5)$$

где I_k – число событий с кратностью k с компенсацией эффекта совпадений.

На рис. 1–3 изображен временной ход интенсивности космических лучей I , средней кратности \overline{Kr} , рассчитанной по формуле (4) без компенсации, и рассчитанной по формуле (5) \overline{Ki} с компенсацией эффекта совпадений для событий в космических лучах в октябре 2003 г., в январе 2005 г. и в декабре 2006 г. Общим для вышеуказанных событий является то, что временной ход средней кратности без компенсации эффекта совпадений \overline{Kr} практически повторяет временной ход интенсивности I . Очевидно, это объясняется тем, что с увеличением или уменьшением интенсивности соответственно увеличивается или уменьшается относительное количество случайных совпаде-

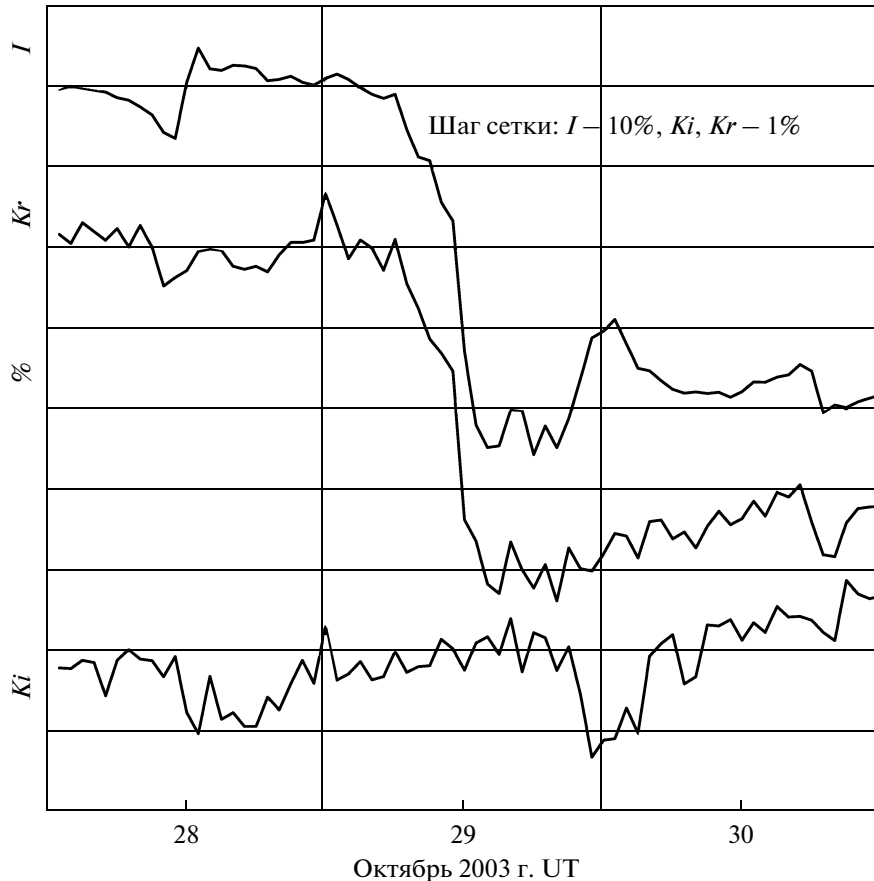


Рис. 1. Временной ход интенсивности I , средней кратности \overline{Kr} без компенсации и \overline{Ki} с компенсацией эффекта совпадений в октябре 2003 г. (На графике \overline{Kr} и \overline{Ki} без верхней черты).

ний кратностей и этот эффект практически перекрывает действительную информацию о вариациях нейтронных кратностей как отражении вариаций энергетического спектра космических лучей. Это означает, что без компенсации случайных совпадений временной ход средней нейтронной кратности приводит к его неправильной интерпретации. Согласно рис. 1–3 во время главной фазы Форбуш-понижений средняя кратность \overline{Kr} уменьшается, что означало бы уменьшение средней энергии космических лучей, а во время возрастаний интенсивности для эффектов GLE средняя кратность \overline{Kr} увеличивается. Это означало бы уменьшение средней энергии космических лучей для главной фазы Форбуш-понижения и увеличение для эффектов GLE, хотя, как известно, имеет место обратный результат, т.е. такой анализ даже приводит к полностью неверному результату.

Далее выполнен анализ средней кратности только с компенсацией эффекта совпадений. В октябре 2003 г. было несколько Форбуш-понижений. Самое большое из них изображено на рис. 1.

Временной ход средней нейтронной кратности показывает ее увеличение во время главной фазы Форбуш-понижения, что интерпретируется как увеличение средней энергии космических лучей за счет уменьшения вклада потока низкоэнергичных нейтронов из-за его взаимодействия с фронтом ударной волны. Согласно рис. 1 это взаимодействие начинается еще во время предповышения перед Форбуш-понижением. В момент начала предповышения в 12:00 28 октября 2003 г. средняя кратность уменьшается и до 18:00 остается на постоянном уровне, с 18:00 до 24:00 относительно быстро увеличивается, а после 24:00 — медленнее, до минимума Форбуш-понижения в 14 ч 29 октября. Соответственно изменяется средняя энергия космических лучей. Во время возрастания интенсивности GLE 29 октября 20:00–30 октября 4:00 средняя нейтронная кратность уменьшается, т.е. уменьшается средняя энергия космических лучей за счет прихода к Земле низкоэнергичных солнечных протонов. В январе 2005 г. произошло три Форбуш-понижения. На рис. 2 изображено второе и третье, а также возрастание GLE. Второе Форбуш-понижение началось 16 января в 12:00, а

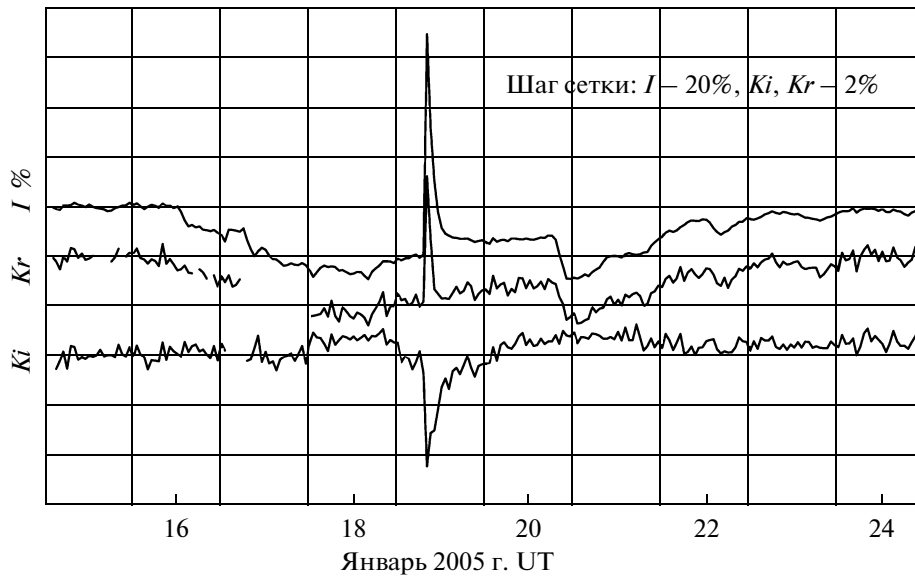


Рис. 2. То же, что и на рис. 1 для января 2005 г.

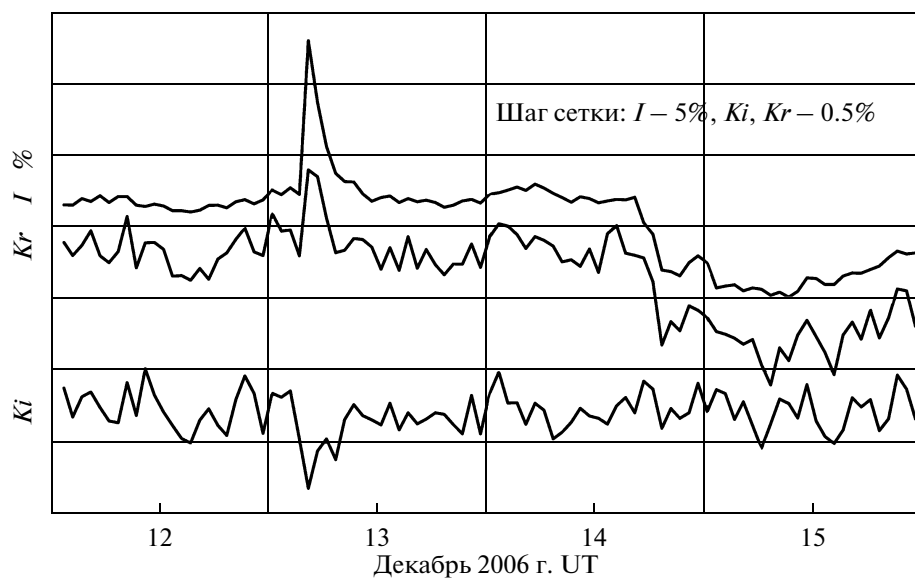


Рис. 3. То же, что и на рис. 1 для декабря 2006 г.

небольшое увеличение средней кратности на 5 часов раньше с 7:00, затем средняя кратность остается на постоянном уровне до 24:00 17 октября. В этом событии средняя энергия космических лучей во время Форбуш-понижения не изменялась, кроме небольшого увеличения за 5 часов до начала Форбуш-понижения. Перед третьим Форбуш-понижением с началом в 19:00 21 января также имело место небольшое понижение средней кратности в 11:00, и затем последовало ее увеличение до 21:00. Далее средняя кратность постоянна до 16:00, но это произошло на фоне фазы восстановления после возрастания интенсивности

GLE 20 января. В декабре 2006 г. было два Форбуш-понижения. Второе из них 14 декабря изображено на рис. 3 вместе с возрастанием GLE 13 декабря. Для этого Форбуш-понижения также имела место возрастание средней кратности, начинающееся за 7 часов до его начала в 17:00, но здесь временной ход средней кратности близок к статистической погрешности измерений. Для всех эффектов возрастаний интенсивности GLE, рис. 1–3, имеет место уменьшение средней кратности, значительно превышающей статистическую погрешность. Таким образом, временной ход средней кратности во время GLE показывает уменьшение

средней энергии космических лучей, что обусловлено приходом к Земле низкоэнергичных солнечных протонов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Корректировка данных по нейтронным кратностям на эффект совпадений является обязательным условием для их применения для анализа вариаций энергетического спектра космических лучей. Это показывают данные по средней нейтронной кратности без учета эффекта совпадений для GLE и Форбуш-понижений. Более того, в этих случаях анализ изменений средней кратности приводит даже к обратному результату. Так, во время GLE средняя кратность с корректировкой на эффект совпадений, уменьшается, т. е. средняя энергия регистрируемых космических лучей уменьшается. Это имеет место за счет прихода на уровень наблюдения солнечных космических лучей низких энергий. Однако без корректировки средняя кратность увеличивается, что интерпретировалось бы как увеличение средней энергии космических лучей. Для Форбуш-понижений без корректировки на эффект совпадений средняя кратность уменьшается, что должно означать уменьшение средней энергии космических лучей, а это было бы неверным. Фактически, средняя нейтронная кратность для GLE и Форбуш-понижений без корректировки на эффект совпадений просто повторяет временной ход интенсивности космических лучей. В тоже время

данные по средней кратности с корректировкой на эффект совпадений позволяют анализировать действительные изменения в энергетическом спектре космических лучей. Так, во время Форбуш-понижений увеличение средней кратности начинается за несколько часов до главной фазы Форбуш-понижения. Таким образом, только с корректировкой на эффект совпадений данные по нейтронным кратностям в нейтронном мониторе можно применять для анализа вариаций энергетического спектра космических лучей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей, М.: Наука, 1027 с. 1975.
- Коротков В.К. К методике получения данных по кратным нейтронам в нейтронном мониторе НМ-64 // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 20. № 2. С. 227–234. 1980.
- Коротков В.К. Способ регистрации кратностей на нейтронном мониторе с компенсацией эффекта совпадений // Авторское свидетельство № 1461200. СССР. 1986.
- Kodama M., Inoue A. Mean multiplicity in the NM-64 neutron monitor and relation to modulation spectrum of primary cosmic radiation // Proc. Inst. Phys. Chem. Res. Tokyo. P. 281–297. 1970.
- Nobles R.A., Alber R.A., Newkirk L.I. et al. White mountain cosmic ray multiplicity monitor // Nucl. Instrum. Methods. V. 70. № 1. P. 45–51. 1969.