

УДК 523.165

Н. А. Иванов

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 ГСП Киев, ул. Академика Заболотного 27**Исследование спектральной чувствительности
двухканального монитора космических лучей**

Рассмотрена возможность использования двухканального нейтронного монитора с большим и малым значениями мертвого времени для регистрации спектра кратностей генерации нейтронов. Экспериментально обоснован метод определения точного значения падающего на монитор потока нейтронов и оценена ошибка, возникающая при использовании данных с $\tau = 1200$ мкс. По данным вспышки 29 сентября 1989 г. исследована динамика запаздывания однократных нейтронов по отношению к общему падающему потоку.

ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ДВОКАНАЛЬНОГО МОНІТОРА КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ, Іванов М. О. — Розглянуто можливість використання двоканального нейтронного монітора з великим і малим значеннями мертвого часу для реєстрації спектру кратностей генерації нейтронів. Експериментально обґрунтовано метод точного визначення потоку нейтронів, що падає на монітор і оцінено похибку, яка виникає при використанні даних з $\tau = 1200$ мкс. За даними спалаху 29 вересня 1989 р. досліджено динаміку запізнення однократних нейтронів відносно повного потоку, що падає.

THE INVESTIGATION OF SPECTRAL SENSITIVITY OF TWO-CHANNEL MONITOR FOR THE COSMIC RAY INTENSITY DETECTION, by IVANOV N. A. — We consider the possibility to use two-channel neutron monitor with long and short dead times for detection of neutron generation multiplicity spectrum. The method for determination of exact value of the neutron flux incident on the monitor surface is experimentally proved and the error caused by using the data with $\tau = 1200 \mu\text{s}$ is estimated. Based on the data for the flare of 29 September 1989, the dynamics of one-fold neutrons delay relative to the complete incident flux is investigated.

При регистрации нейтронного компонента космических лучей (КЛ) нейтронными мониторами можно выделить два случая. В первом монитор регистрирует нейтроны, возникшие в атмосфере. Во втором случае КЛ, попадая в ядра свинца, разрушают их на фрагменты, которые излучают вторичные нейтроны (т. н. «звезду») с некоторым запаздыванием по време-

ни. Количество ν_n таких запаздывающих нейтронов зависит от энергии E первичной частицы КЛ, эта зависимость описывается уравнением [5]

$$\nu_n = 25E^{0.4}$$

Количество нейтронов такой «звезды» убывает по экспоненциальному закону с постоянной распада 330 мкс [8]. Количество нейтронов, зарегистрированных от одной первичной частицы, называют кратностью «звезды», а распределение кратностей — спектром кратностей. Таким образом, спектр кратностей связан со спектром первичных КЛ.

При исследовании спектра кратностей важно определить, являются ли нейтроны, зарегистрированные в определенный промежуток времени τ , генетически связанными, т. е. возникли они от одной первичной частицы или они независимы друг от друга. Разделение этих событий очень важно и производится различными методами, как аналитическими, так и «электронными» [2—4]. Ниже мы предпринимаем попытку разделить количество частиц, падающих на монитор и количество частиц, генерированных в свинце, экспериментально.

С начала 1971 г. на станции космических лучей «Киев» работал двухканальный монитор. Мертвое время первого канала определяется разрешающей способностью счетчиков и электроники и составляет $\tau = 40$ мкс. Во второй канал вводилось искусственно мертвое время $\tau = 1200$ мкс таким образом, что с приходом первого импульса канал прекращал регистрацию следующих за ним импульсов в течение 1200 мкс. Конструктивно монитор состоял из 9 каналов, в каждом из которых работали параллельно два счетчика СМ-15. Наблюдения показали, что он способен отличать вариации, связанные с изменением атмосферного давления, от вариаций, связанных с изменением потока первичных космических лучей.

На рис. 1 приведены данные регистрации КЛ за 14—18 февраля 1978 года. Этот фрагмент характерен тем, что содержит как форбуш-понижение, так и достаточно большой перепад атмосферного давления. Из них видно, что отношение n/N не реагирует на наличие форбуш-понижения и коррелирует только с изменением давления. То же самое свидетельствуют и данные за 7 мая 1978 г. во время зарегистрированной вспышки КЛ (рис. 1, б). Тот факт, что отношение n/N по-разному реагирует на изменения интенсивности КЛ, связанные с изменением поглощения в атмосфере и на такие же изменения, связанные с вариациями первичных КЛ, может свидетельствовать о физическом различии каналов. Так как зависимость интенсивности КЛ, связанная с изменением атмосферного давления, определяется барометрическим коэффициентом, были посчитаны барометрические коэффициенты этих каналов. Оказалось, что они действительно различные.

Для более детального изучения физических процессов, происходящих в мониторе, было решено снять график зависимости отношений n/N от τ в широком диапазоне значений τ . В основу этих экспериментов были положены следующие предположения: так как количество запаздывающих нейтронов в свинце уменьшается по экспоненциальному закону с постоянной времени примерно 330 мкс [8], а количество случайных совпадений одиночных частиц зависит от частоты падающего потока на счетчик монитора — можно ожидать, что с увеличением τ будут наблюдаться два процесса одновременно. При малых величинах τ вероятность совпадения двух независимых нейтронов будет малой, а вероятность дробления «звезды» высокой кратности запаздывающих нейтронов велика. По мере увеличения мертвого времени τ вероятность первого процесса будет увеличиваться, а вероятность второго процесса будет уменьшаться.

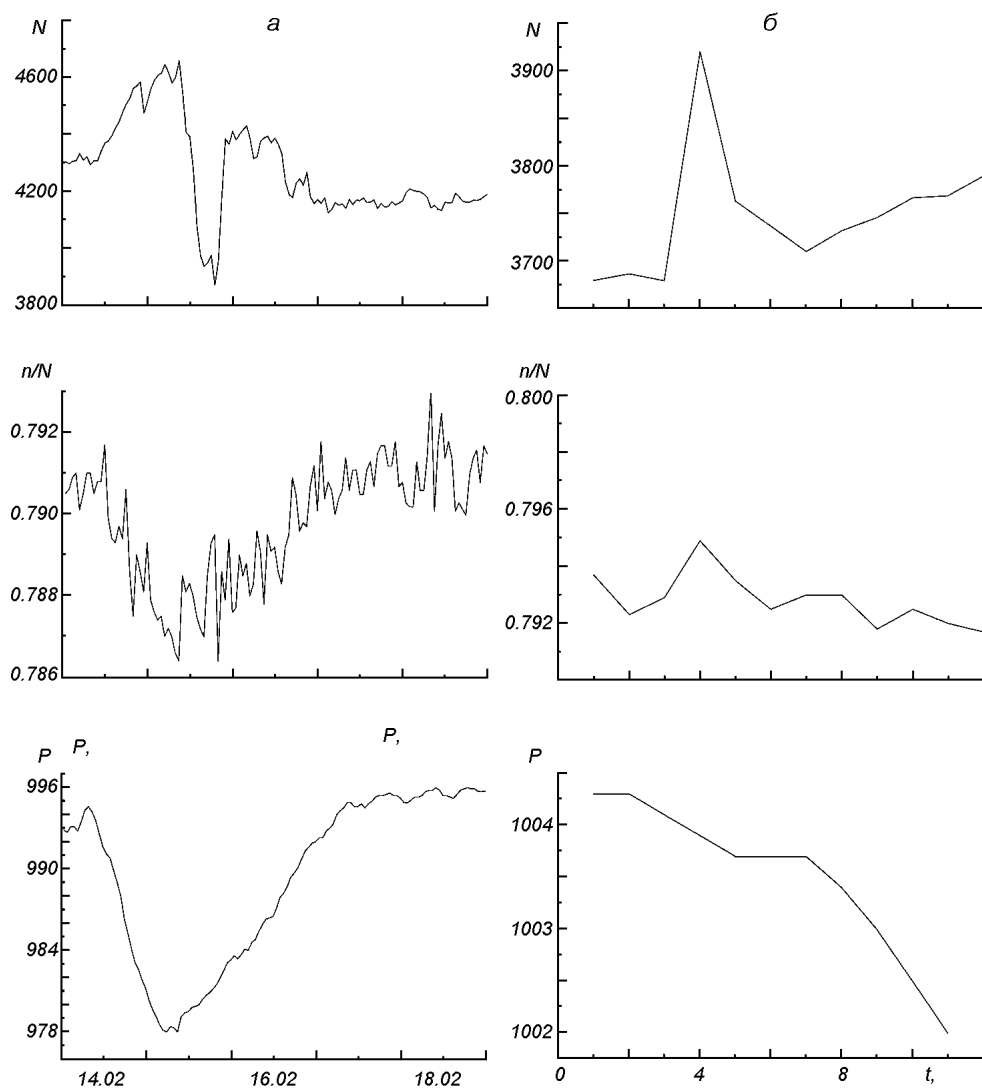


Рис. 1. Среднечасовые значения интенсивности N космических лучей в первом канале ($\tau_1 = 40$ мкс), не исправленные на давление; значения отношений n/N интенсивностей в двух каналах (n — интенсивность во втором канале с $\tau = 1200$ мкс); значения давления P . Данные получены 14—18 февраля (а) и 7 мая 1978 г. (б)

Для изучения этого процесса в динамике был изготовлен ряд одновибраторов, позволяющих изменять мертвое время в широких пределах от $\tau = 36$ мкс до $\tau = 16000$ мкс. В результате проведенных измерений для одной пары счетчиков монитора НМ-64 была получена кривая I (рис. 2). Анализируя эту кривую, можно отметить на ней два характерных участка: от 36 до 4000 мкс — кривая, близкая к экспоненте, и от 4000 до 16000 мкс — прямая линия. Подобная зависимость с использованием совершенно другой методики была получена в работе [5].

Можно предположить, что криволинейный участок характеризует в основном часть запаздывающих нейтронов, возникающих при разрушении ядер свинца, а прямолинейная часть дает просчеты как «звезд», так и одиночных нейтронов, и характеризует поток нейтронов, падающих на

свинец монитора. Таким образом, экстраполируя прямолинейный участок к $\tau = 0$, мы имеем возможность получить количество нейтронов, падающих на монитор. Можно считать, что точка пересечения прямой с осью ординат дает значение отношения падающего на свинец потока ко всему зарегистрированному. Легко заметить, что ордината точки пересечения отличается от ординаты n/N всего на $+0.8 \pm 0.2 \%$, поэтому значение $n_{\tau=1200}$ в дальнейшем было принято считать потоком нейтронов, падающих на монитор. Предположив в первом приближении, что в мониторе регистрируются только однократные и двукратные «звезды», можно записать

$$N_{\tau=40} = n_{k=1} + 2n_{k=2},$$

$$n_{\tau=1200} = n_{k=1} + n_{k=2},$$

откуда получаем две точки спектра кратностей:

$$n_{k=1} = N_{\tau=40} - n_{\tau=1200},$$

$$n_{k=2} = 2n_{\tau=1200} - N_{\tau=40}.$$

Так как нейтроны «звезд» возникают в результате взаимодействия первичных нейтронов с ядрами свинца следовало ожидать, что в безсвинцовом мониторе экспоненциального участка не будет. Для того чтобы в этом убедиться, на Киевской СКЛ были проведены аналогичные эксперименты на безсвинцовом мониторе с применением той же электроники. Безсвинцовый монитор состоял из двух счетчиков монитора НМ-64, окруженных со всех сторон только слоем полиэтилена толщиной 2.5 см. Электронный канал регистрации был аналогичным с применяемым в предыдущих экспериментах. В результате измерений была получена кривая 2 (рис. 2) без экспоненциального участка. Это свидетельствует о том, что экспоненциальный участок действительно связан с взаимодействием КЛ с ядрами свинца. Однако каскадные процессы с рождением нейтронов происходят и в атмосфере, но запаздывающие нейтроны там не образуются из-за того, что ядра элементов, содержащихся в атмосфере, легкие. Скорее всего они разрушаются так, что вторичные нейтроны приходят на счетчик монитора практически одновременно и дают один импульс, независимо от того, сколько их пришло.

Более подробное изучение прямолинейного участка кривой 1 по трем точкам, 4000, 6000, 8000 мкс, измеряемым одновременно, показало, что отклонения от прямой лежат в пределах статистической ошибки. В то же время положение самой прямой зависит от давления и постоянно изменяется. На рис. 2 прямые 3, 4 показывают положение прямой при максимальном и минимальном давлениях на Киевской СКЛ. Такое поведение прямолинейного участка свидетельствует о том, что при $\tau \equiv 4000$ мкс существенным является фактор совпадений одиночных нейтронов, искажающий спектр

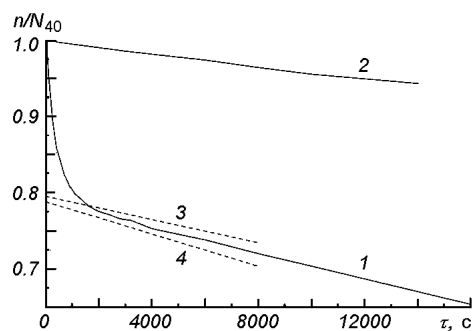
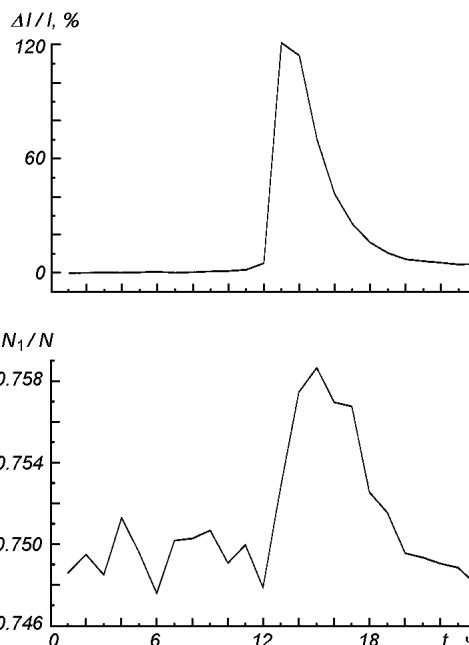


Рис. 2. Зависимость отношений n/N_{40} от мертвого времени τ , где n — интенсивность по каналу с переменным τ , а N — интенсивность по каналу с $\tau = 40$ мкс: 1 — для стандартного нейтронного монитора НМ-64, 2 — для монитора, не содержащего свинца, 3, 4 — положения прямолинейного участка кривой 1 соответственно для максимального и минимального значений давления ($P = 1026$ и 971 мбар)

Рис. 3. Изменение интенсивности $\Delta I/I$ космических лучей и относительного содержания N_1/N однократных нейтронов в падающем потоке во время вспышки 29 сентября 1989 г.



кратностей в сторону повышения средней кратности генерации.

Пользуясь первым приближением по разделению нейтронов по кратностям $N_{k=1}$ и $N_{k=2}$ была исследована вспышка в космических лучах 29 сентября 1989 г. (рис. 3). Уникальность этой вспышки заключается в том, что она имела самую большую амплитуду за последние три цикла солнечной активности. Кроме того, она отличалась большим разнообразием временных профилей возрастания на высокоширотных нейтронных мониторах [1, 6, 7]. Предполагалось, что во время вспышки спектр космических лучей обогащается частицами низких энергий, и в таком случае относительное содержание однократных нейтронов в падающем потоке тоже будет увеличиваться. Таким образом, можно будет проследить динамику изменения спектра кратностей во время вспышки. Среднее значение относительного содержания нейтронов кратности 1 в течение 28 суток месяца сентября 1989 г. составляло 74.85 ± 0.22 %. Во время вспышки максимальное значение составило 75.87 %. Динамика относительного содержания однократных нейтронов показывает, что есть запаздывание как роста на переднем фронте вспышки, так и уменьшения на заднем, а максимум однократных нейтронов достигается на Киевской СКЛ в районе 15.00 UT (рис. 3). Детальнее изучить изменения запаздывания однократных нейтронов не позволило то обстоятельство, что в одном из каналов регистрации время накопления составляло 1 ч. Таким образом, двухканальный монитор позволяет изучать изменения спектра кратностей во время солнечных вспышек, которые являются источниками солнечных космических лучей.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально удалось доказать возможность разделения нейтронов, возникающих в результате ядерных взаимодействий КЛ в свинце, и нейтронов, не дающих такого размножения.

2. Установив дополнительно два канала с мертвыми временами, соответствующими прямолинейному участку (например 4000 и 8000 мкс), можно получить значение потока нейтронов, падающих на монитор, экстраполируя прямую к $\tau = 0$.

3. Из графика 1 (рис. 2) видно, что отношения n/N отличаются от отношений падающего потока, вычисленного экстраполяцией прямой к $\tau = 0$, всего на 0.8 ± 0.2 %, что свидетельствует о правильном выборе $\tau = 1200$ мкс для определения интенсивности нейтронов, падающих на монитор.

4. Показана возможность изучения динамики изменения спектра кратностей в процессе развития вспышки солнечных космических лучей. При этом желательнее иметь два канала с временем накопления информации 5 мин.

1. Байсултанова Л. М., Белов А. В., Гущина Р. Т. и др. Особенности наземного возрастания солнечных космических лучей 29 сентября 1989 г. по данным нейтронных мониторов // Изв. АН СССР. Сер. физическая.—1991.—55, № 10.—С. 1877—1880.
2. Границкий Л. В. Приставка к нейтронному монитору для регистрации кратностей в веществе детектора // Космич. лучи.—1970.—№ 12.—С. 170—173.
3. Капустин И. Н. Исправление данных регистраторов кратностей с помощью математического аппарата // Тр. 6-й Всесоюз. школы по космофизике. — Апатиты, 1969.—С. 117—122.
4. Капустин И. Н. Регистрация кратностей нейтронного компонента космических лучей с компенсацией эффекта совпадений // Геомагнетизм и аэрномия.—1970.—10, № 1.—С. 23—27.
5. Bieber J. W., Clem J. M., Evenson P., et al. New method of observing neutron monitor multiplicities // Proc. 27-th Intern. Cosmic Ray Conf. — Hamburg, 2001.—Vol. 10.—P. 4091—4094.
6. Miroshnichenko L. I., De Koning C. A., Perez-Enriques R. Large solar event of September 29, 1989: ten years after // Space Sci. Rev.—2000.—91.—P. 615—715.
7. Vashenyuk E. V., Miroshnichenko L. I., Perez-Peraza J., et al. Generation and propagation characteristics of relativistic solar protons during the GLE of September 29, 1989 // Proc. 25-th Intern. Cosmic Ray Conf. — Durban, 1997.—Vol. 1.—P. 161—165.
8. Vinje J. A. The possibilities and limitation of neutron multiplicity measurements // Planet. Space Sci.—1974.—22, N 1.—P. 35—39.

Поступила в редакцию 09.09.04