

## ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ АТМОСФЕРНЫХ АДРОННЫХ ЛИВНЕЙ НА НЕЙТРОННОМ МОНИТОРЕ В БАРЕНЦБУРГЕ

Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Э.В. Вашенюк, Б.Б. Гвоздевский (*Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия*)

**Аннотация.** Нейтронный монитор (НМ) 18-НМ-64 в Баренцбурге (арх. Шпицберген) имеет особенность конструкции: он состоит из трех секций 6-НМ-64, расположенных в ряд с расстоянием между смежными секциями около 5 м. Благодаря новой системе регистрации, фиксирующей приход каждого импульса с точностью 1 мкс, появилась возможность наблюдать различные быстрые процессы на НМ, например, явление множественности: регистрация многих нейтронов ( $>5$ ) за короткое время, порядка 1 мс. В настоящей работе исследованы данные НМ на предмет поиска событий множественности  $M$ , возникающих одновременно в двух секциях. Принято, что от каждой секции должно поступить не менее 4 импульсов, т.е. наименьшая множественность  $M = 8$ . Оценка вероятности возникновения таких событий в результате случайного совпадения импульсов дает величину порядка  $10^{-3}$ , что соответствует в среднем появлению одного события за 7-10 дней. В то время как указанные события множественности наблюдаются примерно 20-30 в сутки. Объяснение этого явления состоит в том, что нейтронный монитор регистрирует атмосферные адронные ливни. Оценка поперечных размеров этих ливней дает величину  $>10$  м. Другие характеристики событий множественности, такие как длительность, временной профиль и спектр, близки к соответствующим значениям для событий множественности, наблюдаемых в одной секции.

### 1. Введение

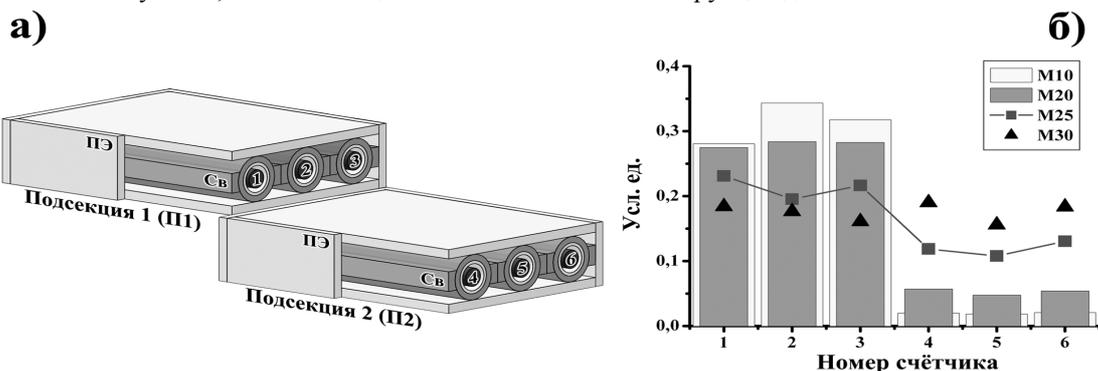
Новая система сбора данных, разработанная в лаборатории космических лучей ПГИ, уже много лет используется на нескольких станциях НМ. Главным достоинством и преимуществом этой системы является фиксация в специальный файл времени прихода каждого импульса с точностью 1 мкс. С установлением этой системы сбора на НМ в Апатитах и Баренцбурге появилась возможность исследовать отдельные нейтронные каскады (ливни), возникающие как в атмосфере над НМ, так и в самом мониторе. Такие нейтронные каскады порождают в нейтронном мониторе явление множественности номера  $M$ , которая представляет в данных серию (кластер) из  $M$  импульсов, разделенных малыми интервалами времени. О возможностях этой системы сбора и обнаруженных с ее помощью явлениях множественности на НМ рассказано в ряде публикаций [1, 2, 3]. В этих работах описан алгоритм поиска и выделения событий  $M$  из потока данных. В работе [4] определены следующие величины: спектр множественностей  $J(M) \sim M^{-4}$  (т.е. частота появления событий) и средняя длительность  $D(M) \sim M^{1/2}$  события в зависимости от номера множественности  $M$ . Наиболее подробно рассмотрены все параметры событий  $M$  в [5]. Отметим особенность НМ: в нем действует правило: один электрический импульс – один нейтрон. В процессе регистрации свободный нейтрон поглощается, вызывая в конечном итоге электрический импульс в трубке.

Наблюдения множественности проводятся издавна, однако, ни одна прежняя система не обеспечивала подробную запись (с сохранением полной информации: номер канала прихода каждого импульса, временные интервалы между ними) всех происшедших событий. Наличие подробной и огромной базы данных по событиям множественности позволило выявить внутри этих событий характерные процессы, связанные с возникновением, развитием и затуханием множественности. Было показано [6], что события множественности с  $M \geq 10$  происходят только от нейтронных каскадов, возникающих в атмосфере над НМ. Такие каскады называются локальными атмосферными ливнями, их производят высокоэнергичные частицы космических лучей. События  $M$  от локальных атмосферных ливней выделяются наличием в них двух фаз (начальной и оконечной), сильно отличающихся между собой. На начальной фазе плотность потока нейтронов держится постоянной, на оконечной фазе она быстро убывает. Характеристики как этих фаз, так и самих событий  $M \geq 10$  не отличаются для столь разнесенных станций, как Баренцбург (арх. Шпицберген) и Баксан (Северный Кавказ).

### 2. Исследование атмосферных ливней с помощью одной секции

НМ в Баренцбурге имеет особенность конструкции, которая помогает лучше понять и исследовать множественности. Дело в том, что стандартный НМ (18-НМ-64) в Баренцбурге состоит из трех секций 6-НМ-64, расположенных в ряд с расстоянием между смежными секциями около 5 м. Кроме того, каждая секция составлена из двух подсекций по три счетчика, т.е. 3-НМ-64. Эти подсекции располагаются так, как показано на рис.1а. Подсекции соприкасаются друг друга только по одному ребру. Подобная конструкция нейтронного монитора 18-НМ-64 с разбиением на секции и подсекции обеспечивает "нейтронную" независимость каждой единицы. Другими словами, нейтроны, родившиеся в процессе ядерных

взаимодействий [7] в одной подсекции, не имеют шансов попасть в другую и быть там зарегистрированными. Во-первых, это следует из геометрических соображений: телесный угол, под которым видна соседняя подсекция, мал, следовательно, мала и вероятность нейтронам, покинувшим одну подсекцию, попасть в другую. Во-вторых, рождающиеся в свинце вторичные нейтроны имеют энергию не более 20-30 МэВ [7, 8], а внешний полиэтиленовый слой эффективно отражает такие нейтроны. Поэтому появление событий множественности одновременно в двух подсекциях одной секции, а тем более в разных секциях однозначно указывает на некий общий внешний источник нейтронов. Конструкция НМ такова, что он чувствителен к нейтронам с энергиями выше 50 МэВ. На уровне земли основным источником нейтронов для НМ являются космические лучи. Именно поэтому сделан вывод, что события множественности  $M \geq 10$  могут быть произведены локальными атмосферными ливнями. В настоящей работе проводится дополнительное изучение, основывающееся на особенностях конструкции данного НМ.



**Рис.1. а)** Конструкция секции НМ в Баренцбурге. ПЭ – полиэтиленовая оболочка-отражатель, Св – свинцовый размножитель нейтронов. Цифрами указаны номера каналов (счетчиков). **б)** Распределение импульсов в событиях множественности по каналам секции. Значения множественностей M10...M30, для которых дано распределение, их обозначение указаны в верхнем углу. С ростом M вклад подсекций выравнивается, что указывает на рост диаметров ливней, вызывающих эти события. Доля вклада второй подсекции для M10 менее 0.1, а при M30 около 1.

Вначале, исследуем события множественности M, учитывая особенность конструкции одной секции, а именно: каково распределение в событиях различных каналов. Выше (см. рис.1а) показано устройство секции. Оно таково, что из одной подсекции вторичные нейтроны не могут попасть в другую. Следовательно, по характеру распределения номеров каналов в событиях данного значения M можно сделать заключение о размерах локальных ливней. Отметим попутно, что с момента начала работы новой системы сбора в Баренцбурге в 2006 г. база данных по событиям M такова, что с хорошей статистической точностью можно исследовать распределение номеров каналов до значений  $M = 50$ .

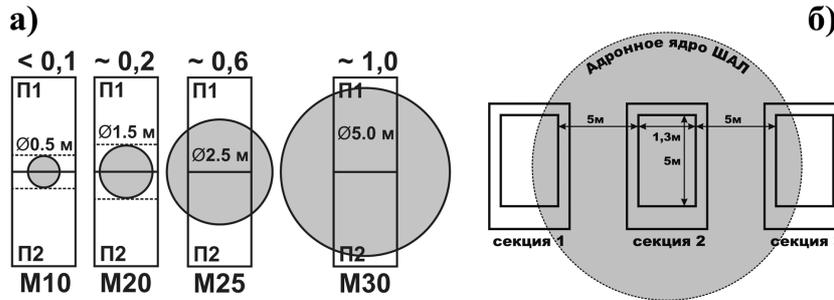
Для этого из всех событий данного M отбирались те, которые начинались с заданного номера канала K. И уже в этих отобранных событиях подсчитывалось общее число импульсов от каждого канала. На рис.1б показан результат – распределение номеров каналов при условии, что события начинаются с канала  $K = 2$  (первая подсекция). Представлены распределения каналов для множественностей  $M = 10, 20, 25$  и  $30$ ; распределения нормированы на 1. При  $M = 10$  и  $20$ , если событие началось в первой подсекции, то и все остальные импульсы, образовавшие это событие, с большой вероятностью будут из этой же подсекции. В нашем случае это каналы 1, 2 и 3. Небольшой (менее 0.05) “хвост” распределения, простирающийся на каналы  $K = 4 - 6$  из второй подсекции, соответствует случаю, когда ливень захватывает обе подсекции, т.е. падает на границу их раздела, как показано на рис.2а. При значении  $M = 25$  распределение заметно выравнивается, однако, еще сохраняется превалирование той подсекции, в которой событие началось. А при  $M = 30$  и больше наблюдается равномерное распределение всех 6 каналов в секции. На этом же рисунке показано схематично, исходя из полученных значений распределений по каналам, как должен располагаться ливень и каков его поперечный размер, чтобы влияние проявилось на обе подсекции в найденной пропорции. Над схематическим изображением секции числа 0.1, 0.2, 0.6 и 1.0 соответствуют примерным соотношениям количества каналов из второй подсекции к первой. Там же показаны размеры (диаметры) ливней для этих значений M, которые могли бы обеспечить наблюдаемое соотношение. Они составляют ~0.5 м для  $M = 10$ , ~1.5 м для  $M = 20$ , ~2.5 м для  $M = 25$  и ~5 м для  $M = 30$ . В ранних наших работах оценки размеров ливней были менее точными и детальными.

Распределение каналов в событиях множественности при существующей конструкции секции НМ в Баренцбурге подтверждает ранее сделанное заключение о том, что наблюдаемые события с  $M \geq 10$  производятся не одной энергичной частицей внутри свинца (процесс размножения нейтронов, описан в [7]), а над НМ в атмосфере, где возникает локальный адронный ливень, приходящий на НМ [1, 6].

### 3. Исследование атмосферных ливней с помощью двух разнесенных секции

Новая система сбора позволяет с той же точность до 1 мкс выделить и исследовать случаи появления импульсов (нейтронов) в двух различных секциях. Нами выбраны секции 1 и 3, которые разделены расстоянием ~12 м (см. рис.2б). Прежде всего, определим, какие события следует искать. Исходя из алгоритма, ранее определенного, обоснованного в [1, 6] и хорошие результаты показавшего, составим новый алгоритм для поиска двухсекционных событий множественности (ДСМ), а именно:

1. Перед событием должен быть интервал длительностью не менее  $T_{\text{рау}} = 5$  мс, как и в обычном алгоритме.
2. Интервал между импульсами в ДСМ не должен превышать значения  $T_0 = 500$  мкс.
3. Для образования события ДСМ от каждой секции должно быть не менее  $N_0$  импульсов. Очередность импульсов от каждой секции в ДСМ не регламентируется.



**Рис.2. а)** Схематическое положение локального адронного ливня (серый круг) и его размера, обеспечивающего регистрацию нейтронов обеими подсекциями. М10..М30 – указывают на номер множественности. Числа вверху показывают долю, которая приходится на вторую подсекцию, относительно первой. **б)** Схема, поясняющая образование ДСМ адронным ядром ШАЛ.

Условия 1 и 2 и значения их параметров в точности соответствуют условиям в алгоритме отбора событий множественности в [1, 6]. Условие 3 как раз задает требование двухсекционности. Значение  $N_0$  в серии исследований принимало значения от 4 до 7. Условие 3 подобно условию сопровождения событий множественности широкими атмосферными ливнями на Баксанском нейтронном мониторе [9].

В [9] уже проводились вычисления образования события М путем случайного расположения импульсов. Найдено, что при реальном темпе счета НМ вероятность случайно образовать последовательность из 5 импульсов (ложное событие  $M = 5$ ) в пределах интервала  $\tau_5 = 700$  мкс (средняя длительность такого события) составляет около  $5 \cdot 10^{-9}$ ; за сутки в среднем таких событий случится  $q = 0.05$ , или одно ложное событие за 20 дней. Реально событий  $M = 5$  в сутки на НМ происходит  $J(5) = 10^4$ . При этом общая длительность их составит  $t_5 = J(5) \cdot \tau_5 = 7$  сек. Следовательно, если примем условие 3 со значением  $N_0 = 5$ , нужно найти вероятность  $p_5$ , означающее, что на реальное событие  $M = 5$  из одной секции наложится ложное событие в другой секции. Из простых соображений следует, что это составит

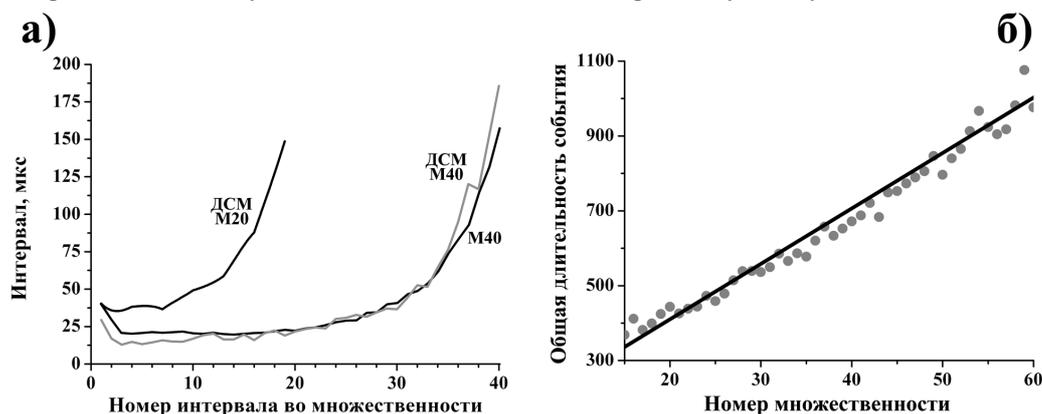
$$p_5 = \frac{3 \cdot t_5}{S} \cdot q \quad (1),$$

где  $S = 86400$  – количество секунд в сутках. Численно  $p_5 = 1.2 \cdot 10^{-5}$  – такова вероятность, что за сутки произойдет ложное ДСМ. Множитель 3 перед  $t_5$  означает, что мы берем худший случай: истинное событие в одной секции и ложное в другой не перекрываются, а стыкуются. Аналогичные вычисления для  $M = 3$  дают значения  $p_3 = 0.08$ . Сравнение  $p_3$  и  $p_5$  показывает, что вероятность случайных совпадений ДСМ падает больше чем на порядок при увеличении М на 1. Поскольку значение  $p_3$  еще не пренебрежимо мало, решено наименьшее значение для  $N_0$  задать 4. Конечно, это не точное значение вероятности образования ложных событий ДСМ, ведь может наложиться истинное событие  $M > 5$  в одной секции на ложное в другой. Но поскольку спектр множественностей  $J(M)$  является степенной убывающей функцией с показателем -4, события с большими М дадут совсем незначительную поправку к вычисленному.

По заданному алгоритму были обработаны данные НМ при значении  $N_0 = 4-7$ . При  $N_0 = 4$  минимальная множественность составит 8, при  $N_0 = 7$  она равна 14. Для каждого значения  $N_0$  набрана база данных, содержащая ДСМ от минимального значения до  $M = 70$ , однако, после  $M = 50$  число таких событий мало, и в этой работе они не рассматриваются. Число ДСМ с  $M = 8$  составляет 10-15 в сутки, что намного порядков больше, чем число случайных совпадений. Затем на основе этой базы определены средний профиль и длительность события ДСМ для каждого значения М в точности так же, как в прежних работах [1, 6] это вычислялось для множественностей в одной секции. Результаты показаны на рис.3. Средние временные профили событий ДСМ практически не отличаются от таковых для одной секции. Временной профиль события М является важной характеристикой, т.к. было найдено [1, 6], что интервалы в событиях М располагаются не случайно. Именно одинаковость профилей подтверждает, что ДСМ есть типичное событие множественности. В то же время зависимость средней длительности события от номера М для

ДСМ оказывается линейной, причем, абсолютные значения примерно в два раза меньше, чем события с тем же номером в одной секции. Также различаются и спектры. Как приводилось в прежних работах, спектр множественностей есть степенная функция с показателем около  $-4$ . Показатель спектра ДСМ для разных  $N_0$  несколько варьируется, принимая значения в пределах  $-(2.5-2.7)$ .

Событие ДСМ на НМ схематически показано на рис.2б. Необходимо, чтобы обе секции накрыл адронный ливень с поперечным размером не меньше 12 м. Подобные размеры имеют адронные стволы широких атмосферных ливней (ШАЛ) [10]. Таким образом, с новой системой сбора и в варианте разнесенных пространственно секций НМ имеет возможность регистрировать адронные стволы ШАЛ. А различия некоторых параметров (при совпадении профилей!) объясняется тем, что ДСМ даже с малыми значениями  $M$  реально являются событиями с огромными числом нейтронов. В силу небольших размеров секций детекторы перехватывают малую часть общего количества нейтронов, существующих в стволе ШАЛ.



**Рис.3. а)** Средний временной профиль событий ДСМ с  $M = 20$  и  $40$ . Для сравнения показан профиль  $M = 40$  одиночной секции. Наличие в профилях ДСМ тех же фаз (начальной и окончательной [6]), что и для случая множественностей в одной секции, подтверждает одинаковую природу множественностей. **б)** Экспериментальная зависимость средней длительности события  $M$  от номера  $M$  и её аппроксимация линейной функцией.

#### 4. Выводы

В настоящей работе представлены исследования по определению размеров локальных атмосферных адронных ливней, вызывающих события множественности на НМ. Использованы особенности конструкции (модульность) НМ в Баренцбурге. Найдено, что размеры ливней растут с номером множественности  $M$  и примерно имеют следующее соотношение: диаметр 0.5 м для событий  $M = 10$ , 1.5 м для  $M = 20$ , 2.5 м для  $M = 25$  и 5 м для  $M = 30$ .

Кроме того, изучено явление двухсекционной множественности на НМ. Проведены оценки вероятности случайного формирования ДСМ: при  $M = 8$  число случайных событий составляет менее  $10^{-3}$  в сутки. Реально в сутки наблюдается 10-15 ДСМ с  $M = 8$ . Временные профили ДСМ совпадают с аналогичными для одной секции. Однако, для образования ДСМ при дистанции между секциями более 10 м требуются адронный ливень с размером более 15 м. Такие размеры характерны для адронных стволов ШАЛ.

#### Список литературы

- [1] Ю.В. Балабин, Д.Д. Джаппуев, Б.Б. Гвоздевский, Е.А. Маурчев, А.У. Куджаев, О.И. Михайлова // Известия РАН, сер. физ., 2011, Т.75, № 3, С.393–395.
- [2] Б.Б. Гвоздевский, Ю.В. Балабин, Э.В. Вашенюк, Д.Д. Джаппуев, А.У. Куджаев // ШАЛ и множественность на нейтронных мониторах // Вестник КНЦ РАН, 2010, Вып. 3, С. 66-71.
- [3] Yu.V. Balabin, E.V. Vashenyuk, D.D. Dzharuev // Proc. of 32<sup>nd</sup> ICRC (Beijing. 11–18 Aug. 2011), Id 684.
- [4] Ю.В. Балабин, Э.В. Вашенюк, Д.Д. Джаппуев, Б.Б. Гвоздевский, Е.А. Маурчев, А.У. Куджаев, О.И. Михайлова // Труды 31-й ВККЛ (Москва, 5-9 июля 2010 г), EAS 13.
- [5] Ю.В. Балабин, Э.В. Вашенюк, Б.Б. Гвоздевский, Д.Д. Джаппуев, О.И. Михайлова // Вестник Кольского научного центра РАН, 2010, Вып. 3, С. 50-65.
- [6] Yu.V. Balabin, B.B. Gvozdevsky, E.A. Maurchev, E.V. Vashenyuk, D.D. Dzharuev // Astrophys. Space Sci. Trans., 2011, V.7, P.283-286.
- [7] Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975, 402 с.
- [8] J.W. Bieber, J.M. Clem, M.L. Duldig, P.A. Evenson, J.E. Humble, R. Pyle // JGR, 2004, V.109, A12106, P.1-6.
- [9] D.D. Dzharuev, Yu.V. Balabin, B.B. Gvozdevsky, N.F. Klimenko, A.U. Kudzhaev, O.I. Mikhailova, V.B. Petkov, E.V. Vashenyuk // Astrophys. Space Sci. Trans., 2011, V.7, P.365-367.
- [10] Хаякава С. Физика космических лучей. Часть 1. М.: Мир, 1973, 701 с.