

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.014

НОВАЯ СЕКЦИЯ НЕЙТРОННОГО МОНИТОРА В ВОСТОЧНЫХ САЯНАХ

Ю.В. Балабин¹, А.А. Луковникова², Б.Б. Гвоздевский¹, А.В. Германенко¹, И.В. Янковский³

¹ФГБНУ "Полярный геофизический институт", Апатиты, Россия

²Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия

³Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик, КБР, Россия

Аннотация. На Саянском спектрографическом комплексе космических лучей на станции космических лучей Иркутск-3 (гора Хулугайша, Восточные Саяны, 3000 м) в 2019 году была запущена в работу дополнительная секция нейтронного монитора (НМ). Ее особенностью является оснащённость скоростной системой сбора данных, созданной в ПГИ. Скоростная система фиксирует время появления каждого электрического импульса от НМ с точностью 1 мкс. Созданные программы обработки позволяют находить в общем массиве данных различные кластеры импульсов, связанные с процессами в НМ или в космических лучах. Это могут быть события множественности числом, появления адронного ствола широкого атмосферного ливня и др. Эта система сбора уже работает на ряде НМ. Впервые скоростная система сбора установлена на столь высокогорном НМ. Обнаружены отличия событий множественности НМ и представлено возможное объяснение.

1. Введение

Существуют два принципиально различных способа регистрации поступающих от детектора импульсов, показанные на рис. 1. Первый способ: подсчет количества импульсов за единицу времени. Выходные данные – темп счета детектора. Вся информация о последовательности поступавших сигналов теряется. Второй путь – фиксация и запись точного времени появления каждого импульса. В этом случае файл данных представляет собой подобие фотографий развертки экрана осциллографа, на котором возникают приходящие импульсы. Детальная информация о последовательностях любых групп импульсов сохраняется полностью. Имеется возможность исследовать взаимное расположение и временные расстояния между любыми импульсами.

Система регистрации, основанная на втором способе, была создана в ПГИ [1]. Ее основные характеристики следующие:

- 1) Шаг измерения времени между импульсами – 1 мкс;
- 2) Количество входных каналов – 32 или 48;
- 3) Мертвое время, в течение которого очередной импульс считается пришедшим одновременно с предыдущим – 6 мкс;
- 4) Максимальный темп счета, при котором не происходит переполнения регистров накопления $\sim 2 \cdot 10^5$ имп/мин.
- 5) Все импульсы с точностью 1 мкс могут быть привязаны к мировому времени.

Созданная скоростная система регистрации в настоящее время установлена на 4 станциях НМ: Баренцбург, Апатиты, Москва, Баксан. В Баренцбурге имеются данные с 2007 г, в Апатитах – с 2014 г. Отметим также, что из данных, сохраненных вторым способом, несложно получить темп счета прибора с любым временным разрешением, какой требуется в конкретной задаче. При сборе данных первым способом временное разрешение исходных данных является максимально возможным.

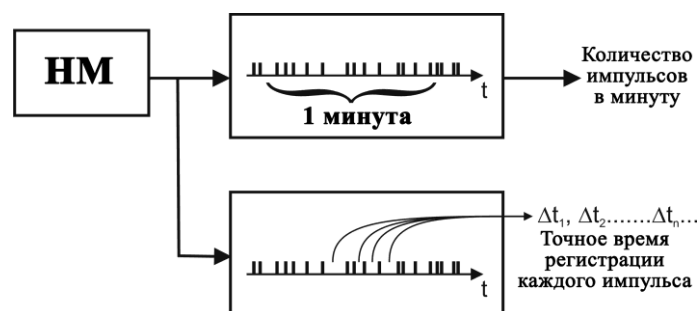


Рисунок 1. Схема двух способов регистрации данных от НМ.

2. Общий анализ полученных ранее результатов

В первую очередь из полученных на станциях данных было построено распределение временных интервалов. Это важная характеристика. Согласно [2], экспоненциальная форма распределения временных интервалов соответствует Пуассоновскому случайному процессу. Построив такое распределение, можно оценить, во-первых, качество работы самой системы сбора данных (например, пропуск импульсов, разделенных коротким интервалом), во-вторых, качество электронного тракта (наличие периодической помехи), в-третьих, оценить степень соответствия потока частиц Пуассоновскому случайному процессу. На рисунке 2 представлены распределения временных интервалов для двух станций: Апатиты и Баксан. Распределения в Апатитах, Баренцбурге и Москве очень близки. Баксан расположен на Кавказе на высоте 1700 м, что его выделяет.

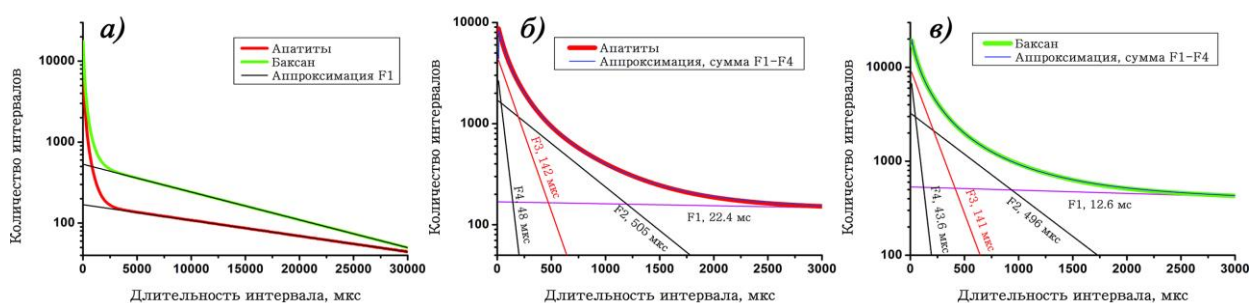


Рисунок 2. Распределение временных интервалов на станциях Апатиты и Баксан. Распределения нормированы на сутки. *а)* – распределение в большом диапазоне значений интервалов. *б), в)* – распределение интервалов в более крупном масштабе. Линии соответствуют экспоненциальным функциям F1-F4 с указанными характеристическими временами. Аппроксимация является суммой всех экспонент на *б)* и *в)*. Экспериментальные данные не сглаживались.

Рисунок 2 демонстрирует, что система регистрации работает без пропусков, в электронных трактах отсутствуют значительные периодические помехи, а сам процесс прихода частиц на НМ описывается случайным Пуассоновским процессом: почти на всем диапазоне времен распределения отлично аппроксимируются простой экспонентой (на рис. 2 обозначена F1). Наклон экспоненциальной зависимости на каждой станции (рис. 2*а*) соответствует среднему интервалу между импульсами ($\tau_1 = 12.6$ мс для Баксана и $\tau_1 = 22.4$ мс для Апатитов) в целом на НМ [2]. Особенностью всех станций является значительный избыток коротких интервалов по сравнению с тем уровнем, который должен обеспечить одинарный пуассоновский процесс (точка пересечения оси ординат и F1). Причина в том, что НМ регистрирует не только одиночные энергичные частицы, попадающие в него, но и вторичные, возникающие от первичных частиц в материале НМ и окружающих предметах. Это называется множественность на НМ [3]. Появление и регистрация вторичных частиц также являются случайным процессом и описываются тоже законом Пуассона. Это хорошо видно на рис. 2*б, в*, где представлены аппроксимации этого избытка. Для полной аппроксимации избытка потребовалось добавить три экспоненты (зависимости F2, F3, F4) с характеристическими временами $\tau_2 \approx 500$ мкс, $\tau_3 \approx 140$ мкс, $\tau_4 \approx 45$ мкс. Каждое характеристическое время означает отдельный пуассоновский процесс [2]. Отметим удивительное совпадение (в пределах ошибки менее 2 %) значений характеристических времен $\tau_2 - \tau_4$ для всех 4 станций. Это указывает на общую физическую причину происхождения процессов генерации вторичных частиц. Первые оценки этих характеристических времен были сделаны еще в [3]. В работе [4, 5] исследовалось воздействие адронных стволов широких атмосферных ливней (ШАЛ) на НМ и были получены близкие к приведенным значениям времен. Объясняется независимость значений характеристических времен $\tau_2 - \tau_4$ от места размещения тем, что они связаны с ядерными процессами в веществе и не зависят от локальных условий. Географические и конструктивные особенности станций проявляются только в значении τ_1 , характеризующего совокупно интенсивность потока частиц в данном месте и чувствительность НМ.

3. Наблюдение множественности на НМ

Созданная скоростная система регистрации позволяет с высокой точностью и детальностью изучать события множественности (события M) на НМ. События M – это группа частиц (при регистрации создающих электрические импульсы), объединенных общим происхождением. На НМ наблюдаются события от $M = 5$ до $M = 100$ и больше. События $M < 5$, конечно, тоже имеются, но их сложно отделять от групп, возникающих случайным образом от флуктуаций потока. Начиная с $M = 5$ доля случайных совпадений становится пренебрежимой (менее 1 %). О том, что это не случайные совпадения, указывает

следующий факт. Например, средняя длительность события $M = 50$ составляет ~ 2 мс, то есть, зарегистрированы 50 частиц в течение 2 мс, когда в среднем частицы появляются через 20 мс (в Апатитах). На базе накопленных за много лет данных были получены следующие характеристики событий M : спектр событий, средняя длительность и средний профиль для каждого значения M . На рисунке 3 показан спектр множественностей.

На всех 4-х станциях спектры имеют степенную форму вида:

$$S(M) = A \cdot M^{-\gamma}, \quad (1)$$

где $\gamma = 3.7-3.8$. Спектры различаются только множителем, который учитывает различия в интенсивности потока космических лучей. Большая интенсивность событий M в Баксане, как предполагалось ранее, связана с расположением НМ в горах. О причинах значительного отличия спектра на ст. Хулугайш будет сказано ниже.

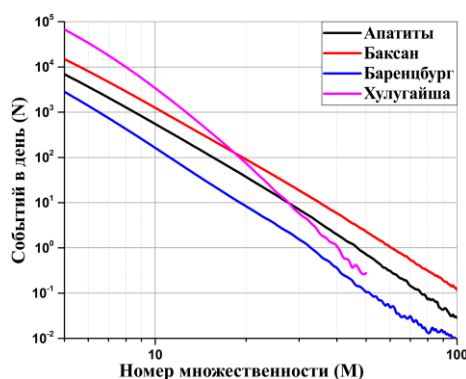


Рисунок 3. Спектры множественностей: зависимость количества событий от числа импульсов в событии. Спектры нормированы на сутки. Для Баксана и Баренцбурга использовано более 4000 дней, для Апатитов – более 2000 дней. Спектры нормированы на сутки. Спектр Москвы близок к спектру Апатитов и не приведен.

Также изучалось расположение импульсов внутри событий M : имеют импульсы в событии склонность концентрироваться в какой-то части или же распределены равномерно? Для получения среднего временного профиля событий M отбирались в данных только события фиксированного M . По рисунку 3 можно оценить количество событий какого-либо M , использованных для получения среднего профиля. Например, событий $M = 20$ в Баксане случается около 100 за сутки, а полное количество составит ~ 400000 . Таким образом, полученные профили имеют очень малую ошибку и высокую достоверность.

На рисунке 4 представлены временные профили событий некоторых M . Профили на всех 4-х станциях близки как по значению (рис. 4б), так и по форме. Следует обратить внимание на следующее. Например, десятый интервал (т.е. временной интервал между 10-м и 11 импульсами) в событиях $M = 30$ и $M = 50$ практически одинаковы (см. рис. 4а, абсцисса равна 10) и составляют ~ 30 мкс. То же самое можно сказать и о 9-м интервале и т.д. При $M \geq 20$ импульсы в первой части события следуют друг за другом примерно на одном и том же расстоянии независимо от значения M . Постоянство (в среднем) временного интервала между регистрациями частиц означает постоянный их поток. Особенностью регистрации нейтрона является его исчезновение в материале счетчика. Следовательно, плотность нейтронов в окружении счетчика сохраняет постоянную величину на протяжении сотен мкс вплоть до единиц мс. Например, для $M = 50$ (рис. 4а) первые тридцать импульсов (создавших тридцать интервалов между импульсами) возникли в НМ с одинаковыми паузами, равными ~ 25 мкс. На протяжении 750 мкс в НМ поддерживалась постоянная плотность нейтронов. При том, что замедление энергичных нейтронов в НМ происходит в среднем за 35-40 мкс [3, 4].

Обращает на себя внимание и такой факт (рис. 4а). Десятый с конца интервал в $M = 30$ (т.е. 20-й интервал) и десятый с конца интервал в $M = 50$ (т.е. 40-й интервал) имеют близкие значения. Это верно также и для 9-ых с конца интервалов, и для 8-ых и т.д. Можно сказать, что временные профили разных M подобны; профили для больших M получаются растяжением средней части профиля с сохранением формы. А рисунок 4б показывает, что оконечные части профилей на разных станциях идентичны, хотя НМ Баксан расположен на Северном Кавказе на высоте 1700 м и темп счета раза в 4 больше, чем темп счета НМ в Баренцбург (на Шпицбергене). Объединяет их одинаковая конструкция НМ. Таким образом, есть серьезные основания считать, что оконечная часть профиля (последние 9-7 импульсов) отражает релаксационные процессы в НМ – время рассасывания и поглощения попавших в НМ нейтронов. Следовательно, оконечная часть профиля

показывает ту множественность, которая возникает в самом НМ за счет испускания ядрами свинца испарительных нейтронов [3]. На рисунке 4б события $M < 10$ целиком состоят из релаксационного процесса, в них отсутствует часть с постоянным значением временного интервала. По-видимому, эти события возникают от попадания в НМ одиночной частицы высокой энергии. Постоянство интервалов на начальной фазе события означает устоявшийся процесс: убывание нейронов за счет их регистрации трубками и диссипация наружу из НМ восполняется новыми, влетающим в НМ из атмосферы. Эта часть события M производится адронными ливнями [4, 5].

Все перечисленное указывает, что события больших множественностей на НМ формируются от адронных ливней, возникающих вне НМ. Такой ливень падает на НМ, пока он действует, в НМ поддерживается постоянная плотность нейтронов. С окончанием ливня плотность нейтронов начинает падать. Адронные ливни возникают не только в стволах ШАЛ, но и как локальные адронные ливни в веществе. Остается открытым вопрос, какие это адронные ливни? Являются ли они адронными стволами ШАЛ или это локальные адронные ливни? В [4, 5] делается вывод, что только события $M \geq 100$ производятся ШАЛ, а меньше – это внутренний эффект НМ. Однако, точную долю локальных ливней указать трудно.

С вводом в эксплуатацию высокогорного НМ Хулугай на основе сравнений событий множественности появилась возможность качественно оценить вклады локальных ливней в образование событий M . Все дело в особых условиях размещения НМ на Хулугае, благодаря которым можно провести сравнение и оценку.

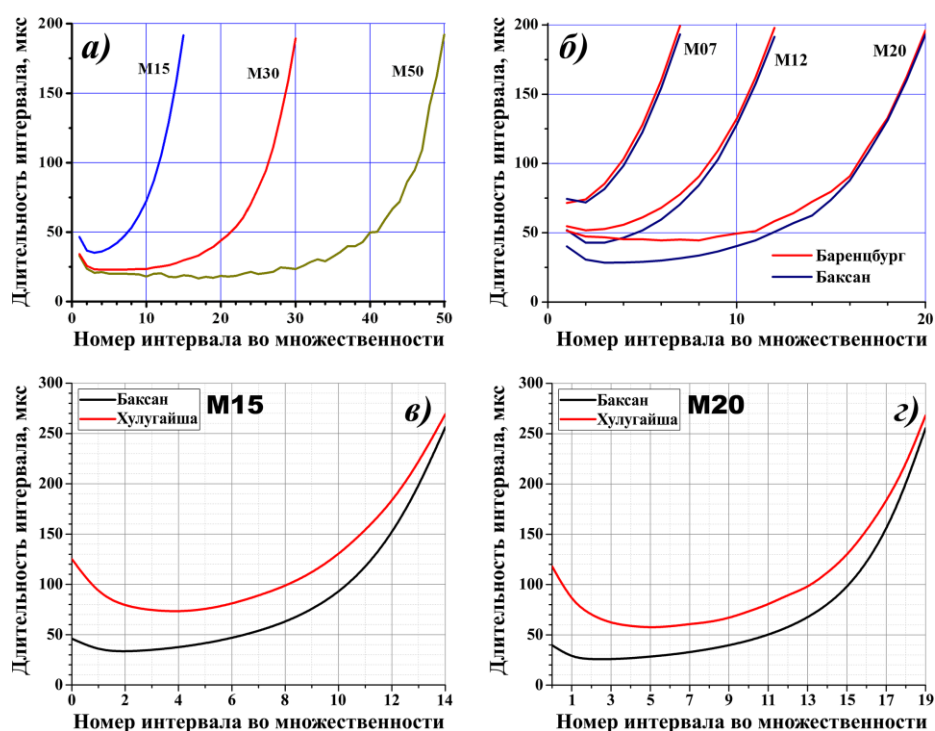


Рисунок 4. Временные профили событий множественности при разных M . а) – профили событий множественности в Апатитах при $M = 15, 30$ и 50 . б) – сравнение профилей множественности при $M = 7, 12, 20$ для двух станций: Баренцбург и Баксан. в) и з) – сравнение профилей $M = 15$ и $M = 20$ на станциях Баксан и Хулугай.

Ожидалось, что на Хулугае событий M будет больше, чем в Баксане [3]. Чем выше над уровнем моря размещен НМ, тем счет его больше. Вопреки ожиданиям, НМ Хулугай регистрирует малое число событий (рис. 3). Точнее, для $M < 10$ предположения подтвердились, спектр множественностей при этих значениях M раза в три выше, чем в Баксане. Однако, с ростом M спектр резко падает, так что при $M \approx 30$ событий M на Хулугае становится равным числу событий в Апатитах – станции равнинной. Сравнение временных профилей (рис. 4в, з) также показывает, что интервал между импульсами в событиях M на Хулугае больше почти в два раза, тогда как при переходе от равной станции Баренцбург к горной станции Баксан, напротив, интервалы уменьшились. Совокупность фактов указывает на нехватку импульсов в событиях M на Хулугае. Сомнений в исправности аппаратуры нет: на Хулугае установлена идентичная Баксану и другим станциям скоростная система регистрации, она была проверена дважды прямо в работе на Хулугае. Темп счета новой секции НМ на Хулугае близок к темпу счета старой секции, работающей уже много лет и имеющей иную систему регистрации, что также указывает на исправность системы.

Сравнивая события множественности и временные профили, можно сделать вывод, что события M на Хулугае примерно в два раза беднее импульсами. Регистрируемое на Хулугае событие как $M = 20$, соответствует $M = 40$ на Баксане. Если так проделать со всеми событиями $M > 20$, то спектр Хулугае ляжет выше Баксана целиком, временные профили станут близки к Баксану. С учетом всех изложенных выше факторов предложено следующее объяснение аномалии. Как упоминалось выше, приходящие на НМ адронные ливни состоят из адронных стволов ШАЛ и локальных адронных ливней, добавляющихся к первым. Локальные адронные ливни возникают в веществе от энергичных частиц, разбивающих ядра атомов, в том числе от частиц ШАЛ [3, 4]. С увеличением количества вещества и заряда ядер интенсивность локальных ливней возрастает. В Баренцбурге НМ расположен в домике с утепленной железной крышей (основной состав: тяжелые ядра Fe), плотность вещества над НМ невелика. В Апатитах и Москве НМ находится в одноэтажном строении с крышей из дерева, железа и керамического утеплителя в перекрытии (основной состав: ядра Fe, Ca, Si, Na, O, C). В Баксане НМ расположен в здании, имеющей крышу из бетонных плит – наиболее толстое и массивное перекрытие (основной состав: ядра Ca, Si, Na, O). На Хулугае НМ находится в легком деревянном строении с деревянной крышей и с пенопластовым утеплителем (основной состав: ядра O, C, H). Чем меньше вещества или чем легче составляющие его ядра, тем ливни менее обильные.

Интересно отметить, что завал спектра Хулугая на рисунке 3 начинается при $M \approx 10$. Значения $M = 7-9$ граничные, когда тип генерации множественности сменится с испарительной на иную. Это показывает, что поток высокоэнергичных частиц на НМ в Хулугае действительно выше, чем в Баксане, как и должно быть [3]. Это еще одно подтверждение генерации событий больших M от адронных ливней.

Следовательно, можно заключить, что вклад локальных ливней в события множественности существенный. Это требует дальнейшего изучения. Пока данных НМ в Хулугае недостаточно, чтобы продлить спектр хотя бы до $M = 100$ и найти распределение интервалов внутри событий множественности. Тогда можно будет узнать характеристические времена распределений и сравнить их с такими же на других станциях.

4. Заключение

На станции НМ Иркутск-3 (Восточные Саяны, г. Хулугай, 3000 м) запущена в работу дополнительная секция нейтронного монитора 6-НМ-64, оснащенная скоростной системой регистрации. Обработка данных показала существенно отличие событий множественности на этом НМ от четырех других НМ, на которых также ведется регистрация событий множественности. Предложена гипотеза, объясняющая это отличие. События множественности производят адронные ливни, приходящие на НМ. В силу местных условий на Хулугае состав адронных ливней иной, в нем мала доля локальных адронных ливней.

Список литературы

1. *Balabin Yu.V., Gvozdevsk B.B., Maurchev E.A. et. al.* // *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011. V.7. P.283–286.
2. *Гольданский В.И., Куценко А.В., Подгорецкий М.И.* Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц, М:Физмат, 1959, 411 с.
3. *Дорман Л.И.* Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей, М.: Наука, 1975, 402 с.
4. *Stenkin Yu.V.* // *Modern Physics Letters A.* 2002. V.17. №26. P.1745-1751.
5. *Stenkin Yu.V., Djappuev D.D., and Valdes-Galicia J.F.* // *Physics of Atomic Nuclei.* 2007. V.70. №6. P.1088-1099.