



DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.019

МЮОННЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В АПАТИТАХ И БАРЕНЦБУРГЕ

Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко, Е.А. Маурчев, Е.А. Михалко

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

Абстракт

Комплексы для мониторинга космических лучей запущены в работу на двух станциях: в Апатитах и в Баренцбурге (Шпицберген). Основу комплекса составляют нейтронный монитор и мюонный телескоп. Нейтронные мониторы производят прием потоков космических лучей в приэкваториальной области небесной сферы, а у мюонных телескопов приемные конусы направлены в область северного полюса эклиптики. Представлен первый анализ данных уникального комплекса.

1. Введение

Полярный геофизический институт (ПГИ) имеет станции космических лучей в Апатитах (Мурманская область) и в Баренцбурге (арх. Шпицберген). К настоящему времени на обеих станциях помимо стандартных нейтронных мониторов 18-НМ-64 установлены мюонные телескопы для мониторинга космических лучей (КЛ). Нейтронный монитор (НМ) предназначен для регистрации нуклонной компоненты вторичных КЛ, возникающей от первичных КЛ при попадании их в атмосферу Земли. Эффективный диапазон энергий первичных КЛ для НМ составляет от 0.5 до ~20 ГэВ с максимумом чувствительности при единицах ГэВ [1]. Эффективный здесь означает обеспечивающий вклад в общий темп счета ~90 %. Мюонный детектор чувствителен к заряженным частицам: мюонам, электронам и позитронам. Специальным расположением детекторов и условиями их совместной работой создается мюонный телескоп (МТ). МТ позволяет сузить диаграмму приема в небольшой области небесной сферы. Пороговая энергия первичной частицы КЛ, от которой после взаимодействия с ядрами атомов атмосферы мюоны могут достигнуть поверхности земли, составляет ~5 ГэВ, а основной вклад в счет МТ обеспечивают КЛ с энергиями 50-100 ГэВ [1]. НМ является наиболее распространенным прибором для регистрации КЛ. За многие десятилетия работы нейтронные мониторы показали высокую стабильность.

Объединение НМ и МТ расширяет энергетический диапазон, в котором производится мониторинг КЛ, что позволяет наблюдать и изучать влияние многих факторов межпланетной среды на космические лучи в зависимости от их энергии.

2. Станции Апатиты и Баренцбург

В последний десяток лет ПГИ на своих станциях КЛ Апатиты и Баренцбург модернизирует и развивает как аппаратную часть, так и программную. В настоящее время на этих станциях осуществляет мониторинг КЛ многоканальный комплекс. Стандартные НМ (18-НМ-64) на этих станциях оснащены скоростной системой регистрации, фиксирующей появление каждой частицы с точностью до 1 мкс; записывается также и номер канала (номер счетчика), где это произошло. Это перевело НМ в разряд многопрофильных детекторов: помимо измерения вариаций потока КЛ проводятся наблюдения за различными быстропротекающими процессами в КЛ [2, 3].

На станциях также завершена установка мюонных телескопов. В настоящее время МТ собраны по простой схеме: пара сцинтилляционных пластин, расположенные одна над другой, разделены слоем свинца. МТ имеет следующие характеристики: тип сцинтиллятора – органический, площадь каждой пластины 0.25 м², поле зрения около 1 ср. Толщина свинцового слоя 100 мм, размеры свинцового слоя в несколько раз больше размеров пластин, таким образом, каждая из пластин МТ принимает мягкие частицы только из соответствующей полусферы. МТ имеет три выходных канала: импульсы от верхней пластины, от нижней и от схемы совпадений. Схема совпадений выделяет из общего потока мюоны, попадающие в МТ из зенитной области неба и имеющие достаточно энергии, чтобы преодолеть слой свинца и обе сцинтилляционные пластины. Нижний энергетический порог для этих мюонов составляет ~300 МэВ на уровне земли или ~2 ГэВ при образовании в атмосфере. Наличие отдельных выходов от пластин позволяет с помощью МТ измерять не только поток высокоэнергичных мюонов из зенитной области, но и потоки мягких заряженных частиц с энергиями >10 МэВ, приходящих со всей полусферы. Верхняя пластина регистрирует заряженные частицы, приходящие из верхней полусферы (в основном это мюоны умеренных энергий, электроны и позитроны) и

образующиеся в толще атмосфере от космических лучей; нижняя пластина принимает также радиацию от почвы и окружающих предметов.

Несмотря на простую конструкцию МТ, наличие отдельных выходов от каждой пластины позволяет использовать данные МТ совместно с данными гамма-спектрометра для разделения вариаций. Детекторами мягкого гамма-излучения служат кристаллы NaI(Tl), которые одинаково хорошо чувствительны как к гамма-квантам, так и к заряженным частицам. Пластиковый сцинтиллятор, использованный в МТ, к гамма-излучению малочувствителен; и сравнение данных кристаллических и пластиковых детекторов позволяет выделять вариации в отдельных компонентах излучения [4].

Космические лучи в основном состоят из протонов. Магнитосфера Земли искривляет траекторию заряженных частиц. Таким образом, направление движения частицы в точке попадания в атмосферу не соответствует направлению движения перед входом в магнитосферу. Искривление траектории частицы при прочих равных условиях определяется ее жесткостью R [1] (жесткость частицы R определяется ее импульсом и зарядом; для протона при $R \gg 1$ ГВ энергия E (ГэВ) вычисляется следующим образом: $E \approx R \cdot 1$). Протоны с жесткостью в единицы ГВ отклоняются в магнитном поле Земли значительно. К примеру, для протона с $R = 1$ ГВ отклонение составляет более 120 градусов для станции Апатиты. Станция Баренцбург располагается в области магнитосферного каспа, отклонение для такой же частицы составляет 20-40 градусов. Обычно для НМ рассчитывается асимптотический конус (АК) приема – совокупность направлений, из которых возможен прием на данной станции частиц разной жесткости, попадающих в магнитосферу из межпланетного пространства [5, 6]. С увеличением жесткости отклоняющее воздействие магнитосферы на частицу уменьшается; для частиц с жесткостью в десятки и сотни ГВ оно незначительно. Таким образом, для МТ можно принять, что его геометрическое поле зрения является и направлением приема, тогда как для НМ это определенно не так. Кроме того, особенность строения магнитосферы Земли приводит к тому, что АК приема отклоняются в сторону магнитного экватора Земли. Все это приводит к тому, что даже околополярные станции НМ имеют направления приема, далекие от направления на полюс эклиптики (пример расположения конусов приема мировой сети НМ имеется в [6]). Приведены конуса приема в диапазоне жесткостей 1-20 ГВ, нужно иметь в виду, что эффективный участок конуса, обеспечивающий 90 % счета НМ, находится в диапазоне 3-7 ГВ). Большинство НМ мировой сети (куда входит четыре десятка станций) принимают космические лучи из приэклиптикального пояса направлений (не более $\pm 40-50^\circ$ от эклиптики), и только станции Южный полюс, Туле и Баренцбург могут в некоторых положениях и при определенном состоянии магнитосферы иметь АК приема вблизи полюса эклиптики. Таким образом, потоки космических лучей из направлений на северный полюс эклиптики малодоступны для наблюдений с помощью НМ. Включение в работу мюонных телескопов на полярных станциях обеспечило постоянный мониторинг КЛ из этого направления. Схематично расположение направлений приема разных приборов показано на рис. 1. Стоит отметить, что АК приема изменчивы, их положение и угловая протяженность зависят от состояния магнитосферы, которая определяется солнечной активностью и межпланетной средой. Диаграмма направленности МТ в Апатитах тоже меняет положение за счет вращения Земли, однако, она сохраняет свое положение вблизи северного полюса эклиптики, а для Баренцбурга северный полюс эклиптики никогда не выходит из диаграммы направленности.

В настоящей работе внимание уделено именно сравнению и анализу данных, полученных с помощью НМ и МТ на двух полярных станциях.

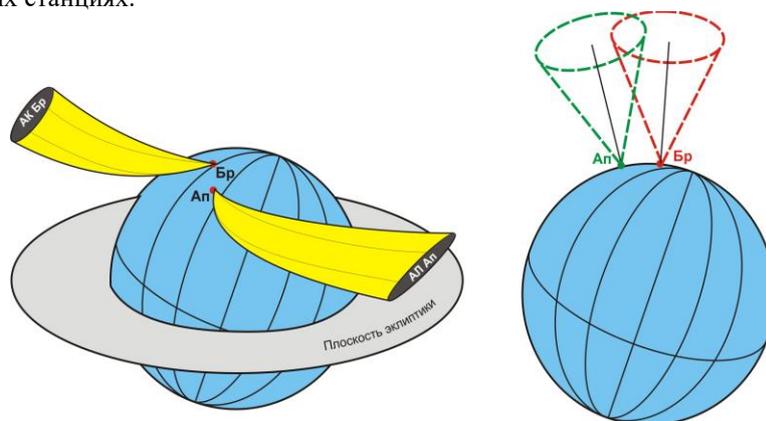


Рисунок 1. Слева - схематичное расположение в пространстве асимптотических конусов (АК) приема НМ для Апатитов (Ап) и Баренцбурга (Бр). Справа - диаграммы направленности МТ на этих станциях.

3. Методика сравнения

В полном составе (НМ и МТ) комплексы на обеих станциях заработали с октября 2021 г. Таким образом, имеется ряд длиной примерно в полгода, содержащий данные всех четырех приборов. Вполне достаточно как для оценки методики, так и получения представления о ценности получаемых данных.

Как было сказано выше, исходные данные НМ и МТ перед использованием требуют коррекции: удаление вариаций, связанных с локальными условиями. Из данных НМ необходимо удалить вариации, вызванные изменением атмосферного давления (барометрический эффект), а для МТ, помимо барометрического эффекта, требуется внести исправления и на температурный эффект. Методы внесения указанных исправлений были давно разработаны [1, 7] и эффективно применяются. Современные модели атмосферы, основанные на многолетних измерениях состояния атмосферы на поверхности земли и на разных высотах с помощью зондов, а также современные вычислительные мощности позволяют получать надежные данные о состоянии атмосферы в любой точке и на любой высоте путем расчета. В силу этого внесение температурных коррекций в данные любого МТ стало точным, поскольку возможно получить температурный профиль атмосферы в конкретной точке, где размещен МТ [8, 9], а не в точке запуска зонда, и заданное время. С помощью метода эффективной температуры, использующего современные модели атмосферы, корректировались данные МТ на наших станциях [10].

Для выделения вариаций, различающихся на двух приборах, вычислялось отношение скоростей счета. Такой подход дает возможность выявить именно различия в вариациях, а одновременные изменения счета нивелируются. Изменение отношения счетов двух приборов, принимающих потоки КЛ из различных направлений, означает изменение величины анизотропии КЛ, измеренной по этим направлениям. Анизотропия КЛ определяется по данным мировой сети НМ, но эти измерения носят глобальный характер. А поскольку большинство НМ имеют асимптотические конусы приема вблизи плоскости эклиптики, то и результат описывает анизотропию в приэклиптикальном поясе.

На рис. 2 приведены вариации отношения скоростей счета НМ в Апатитах и Баренцбурге, то есть $(\text{НМ}_{\text{Ап}})/(\text{НМ}_{\text{Бр}})$. Далее везде использованы часовые данные, а вариации отношения даны в процентах к среднему уровню. Интересно отметить кратковременные провалы почти до 95 %, имеющиеся на графике около значений $X = 21.84$ и $X = 22.20$. Они соответствуют значительным форбуш-понижениям, происшедшим 04.11.21 и 14.03.22, которые были отмечены на мировой сети НМ. Эти короткие, на 2-3 часа, уменьшения отношения указывают на неодновременность прихода форбуш-понижения на станции Апатиты и Баренцбург, тогда как сам форбуш-эффект на графике не отразился, поскольку глубина понижения на полярных станциях была одинаковой. Неодновременность начала форбуш-эффекта связана с тем, что АК Апатитов и Баренцбурга располагались в разных направлениях. Также отметим, что вариации, связанные с изменениями геомагнитной жесткости обрезания R_c при возмущении магнитосферы, для указанных двух станций не принимаются во внимание, поскольку $R_c = 0.6$ ГВ для Апатитов, $R_c \sim 0$ ГВ для Баренцбурга, и для них определяющим является атмосферная жесткость обрезания 1 ГВ.

Отметим, что представленные вариации отношения счетов НМ на двух станциях сложно привязать к конкретным направлениям в пространстве. Причина, как выше отмечалось, в том, что АК существенно изменяет свое положение и форму в зависимости от многих условий и процессов в магнитосфере и окружающем космическом пространстве. Потребовалось бы рассчитывать АК для двух станций каждый час, что весьма трудоемко даже для современных вычислителей. Представленные на рис. 2 вариации отношения качественно показывают, что имеются долговременные неоднородности в потоке КЛ около плоскости эклиптики. Например, при $X \sim 21.8$ наблюдается возрастание отношения на 2%, что в несколько раз выше типичных вариаций на протяжении большей части наблюдений. Причем, это возрастание устойчиво держалось нескольких недель.

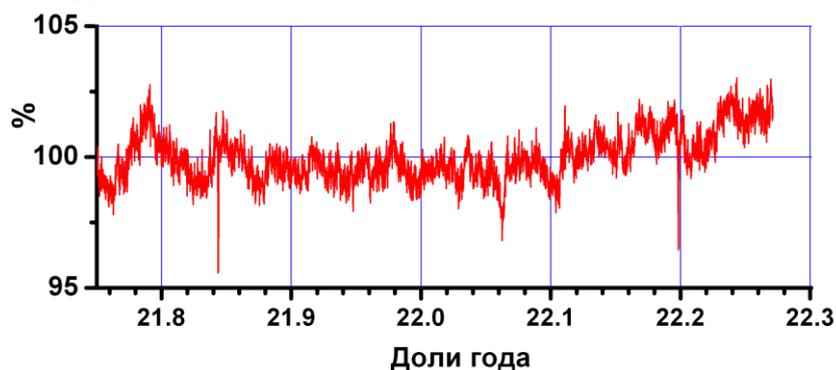


Рисунок 2. Вариации отношения скоростей счета НМ в Апатитах и Баренцбурге, т.е. отношение $(\text{НМ}_{\text{Ап}})/(\text{НМ}_{\text{Бр}})$.

Еще показательнее сравнение вариаций отношения $(\text{НМ_Ап})/(\text{НМ_Бр})$ и $(\text{МТ_Ап})/(\text{МТ_Бр})$, представленных на рис. 3. Как видно из рис. 1, конусы приема МТ в Апатитах и Баренцбурге обращены к полюсу эклиптики. Большие вариации отношения счета, наблюдавшиеся в октябре-ноябре 2021 г. на паре НМ, мало затронули МТ. А значительные вариации отношения счета пары МТ, наблюдавшиеся в течение декабря 2021, не проявились на НМ. Вариации в феврале-марте 2022, напротив, происходили синфазно на парах НМ и МТ, причем, амплитуда больше на отношении $(\text{МТ_Ап})/(\text{МТ_Бр})$. Изучение данных МТ показывает, что изменение счета произошло на МТ в Апатитах, а в Баренцбурге счет в этот период стабилен. Также в последние месяцы наблюдается тенденция к росту отношений на обеих парах приборов, причем рост отношения связан с ростом счета в Апатитах при более-менее стабильном счете в Баренцбурге. Возможно, это часть годовой вариации. Недостаточная длина ряда данных не позволяет пока сделать определенное заключение.

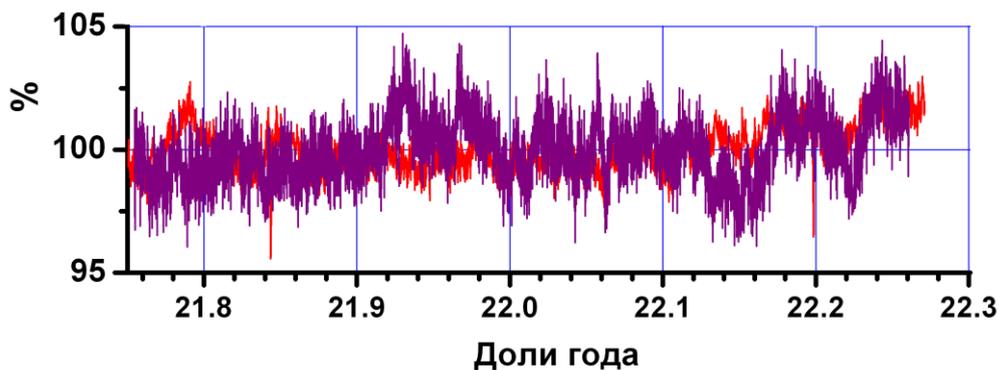


Рисунок 3. Вариации отношения счета НМ $(\text{НМ_Ап})/(\text{НМ_Бр})$, красный цвет, и отношения счета МТ $(\text{МТ_Ап})/(\text{МТ_Бр})$, лиловый цвет.

4. Обсуждение

Изменение отношения скорости счетов двух приборов при корректном внесении поправок на барометрический и температурный эффекты означает изменение величины анизотропии КЛ. Отсутствие какого-либо проявления форбуш-эффекта на отношении двух НМ (исключая начальную фазу, где проявилась неодновременность начала форбуш-понижения) подтверждает корректность поправок, вносимых в данные НМ. Что касается данных обоих МТ, такого четкого эффекта для проверки пока не представилось, но сомневаться в методике исправления температурных вариаций нет оснований, подобная методика используется на других МТ в течение многих лет.

Размещение двух пар одинаковых приборов для мониторинга КЛ на двух полярных станциях дает возможность проводить прямые измерения вариации КЛ в малодоступной области полюса эклиптики. При этом одна станция размещена вблизи полюса в области магнитосферного каспа, другая – более, чем на десяток градусов южнее. Пара НМ, размещенных на этих станциях, эффективна в приеме относительно мягких КЛ в единицы ГэВ, их АК располагаются вблизи плоскости эклиптики, не возвышаясь над ней более 40-50 градусов. На направление АК также влияет суточное вращение Земли: АК поворачивается вместе со станцией. Пара МТ на этих станциях обеспечивает прием КЛ из области вблизи полюса эклиптики несмотря на суточное вращение Земли. Вычисление отношений счетов любых двух приборов и анализ вариаций этих отношений дает информацию об анизотропии КЛ, в первую очередь в направлениях на полюс эклиптики и в плоскости эклиптики.

Достоверно связать вариации отношений с параметрами межпланетной среды (напряженность магнитного поля, скорость и плотность солнечного ветра) пока не удастся: коэффициент корреляции между приведенными вариациями и параметрами межпланетной среды составляет ~ 0.5 , что может означать наличие неустойчивой связи, на которую воздействуют и неизвестные пока факторы.

Следует признать, что имеющийся набор данных недостаточен для выявления устойчивой связи. Кроме того, часовое усреднение слишком мелкое, суточные данные будут более подходящими: в них автоматически произойдет устранение суточной вариации, амплитуда которой на НМ доходит до 0.5%. Часовое усреднение использовано для демонстрации точности внесенных поправок: показан эффект запаздывания прихода форбуш-понижения на разные станции. Имеющийся ряд данных также короткий и для проведения Фурье- или вейвлет-анализа, особенно если использовать суточное усреднение. Длина ряда наблюдений пока такова, что позволила увидеть единичные события вариаций анизотропии КЛ, подтвердила перспективность объединения приборов на двух полярных станциях. Требуется продолжить наблюдения в течение нескольких лет, а предпочтительнее – весь 25-й цикл солнечной активности. При вычислении отношения счета двух станций 11-летняя модуляция КЛ солнечной активностью полностью устраняется, как это показано в [10], и

проявляются вариации меньшей амплитуды. Также расширенный анализ длинного ряда наших данных может выявить характерные вариации (к примеру, 27-дневную, годовую), которые на разных фазах цикла могут усиливаться или подавляться.

Отметим также, с помощью метода глобальной съемки, используя мировую сеть наземных детекторов КЛ, определяют глобальную анизотропию КЛ и ее вариации при различных условиях: форбуш-понижениях, событиях GLE, фазах солнечного цикла и пр. А "локальные" (в пределах одного стерадиана и менее) вариации анизотропии этим методом значительно сглаживаются. Наблюдения парой приборов в высокоширотной области дополнит общую глобальную картину анизотропии КЛ более детальными данными.

5. Заключение

Представлены первые результаты работы двух пар одинаковых приборов, включенных в комплексы, выполняющие мониторинг космических лучей на двух полярных станциях Апатиты и Баренцбург (Шпицберген). На обеих станциях работают нейтронные мониторы и мюонные телескопы одного типа конструкции. Различия состоят только в направлениях, из которых осуществляется прием космических лучей. Причем, даже на одной станции нейтронный монитор и мюонный телескоп существенно различаются направлениями приема. Сравнение вариаций отношений скоростей счета на этих приборах определяет степень изменения анизотропии космических лучей в направлениях приема. Особенно ценными представляются вариации анизотропии в области северного полюса эклиптики, которая доступна для наблюдений весьма малому числу детекторов из мировой сети наземных станций за наблюдениями космических лучей.

Благодарность

Работы выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-77-10018.

Литература

1. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 462 с.
2. Balabin Yu.V. et al. // *Astrophys. Space Sci. Trans.*, 2011, V.7, p.283, doi:10.5194/astra-7-283-2011
3. Балабин Ю.В. и др. // *Геомагнетизм и аэрномия*, 2015, Т.79, №5, с.708, doi:10.7868/S0367676515050117
4. Вяземский В.О., Ломоносов И.И., Писаревский А.Н. Сцинтилляционный метод в радиометрии. М.: Госатомиздат, 1961. 430 с.
5. Tsyganenko N.A. // *J. Geophys. Res.*, 2002, V.107, p.1176, doi:10.101029/2001JA000219
6. Perez-Peraza J.A. et al. // *Adv. Space Res.*, 2008, V.41, p.947, doi:10.1016/j.asr.2007.04.054
7. Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972. 210 с.
8. Беркова М.Д. и др. // *Ядерная физика*, 2018, Т.81, №6, с.673, doi:10.1134/S0044002718050045
9. Осипенко А.С. и др. // *Известия РАН, серия физическая*, 2015, Т.79, №5, с.721, doi:10.7868/S0367676515050336
10. Балабин Ю. В. и др. // *Известия РАН, серия физическая*, 2021, Т.85, №3, с.310, doi:10.31857/S0367676521030030