

ВАРИАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

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

Аннотация. В Апатитах и Баренцбурге (арх. Шпицберген) на станциях космических лучей уже несколько лет проводится мониторинг естественного рентгеновского излучения в атмосфере. Найдено, что это излучение носит локальный характер: оно возникает непосредственно в приземном слое воздуха, но не связано с радиоактивностью, а является тормозным излучением электронов. На основе данных, полученных в 2009-2010 гг, произведен поиск вариации рентгеновского фона и его корреляции с суточной вариацией в космических лучах. Применен метод наложения эпох. Обнаружена суточная вариация рентгеновского фона, находящаяся в противофазе с вариацией на нейтронном мониторе в Апатитах. Аналогичная вариация в Баренцбурге существенно меньше по амплитуде. Исследованы вариации нейтронного фона, связанные с возрастаниями рентгеновского излучения, наблюдающимися при выпадении осадков. Оценки показывают, что амплитуда этих вариаций может вызываться увеличением интегральной толщины вещества в атмосфере над нейтронным монитором во время выпадения осадков.

Введение

На станции космических лучей в ПГИ создана комплексная система мониторинга радиационного фона в различных видах излучений: нейтронной компоненты, низкоэнергичной заряженной и низкоэнергичной электромагнитной компонент. Мониторинг низкоэнергичного гамма (рентгеновского) фона на уровне земли, проводимого в ПГИ в течение ряда лет на двух станциях (Апатиты и Баренцбург) показывает возрастания, связанные с атмосферными осадками и достигающие до 50 % от фона. Существование избыточного излучения, связанного с атмосферными осадками и грозами является известным фактом [1, 2]. Следует отметить, что в субарктическом (Апатиты) и арктическом (Баренцбург) регионах, где проводятся наблюдения, грозы почти не наблюдаются. Подробно о возрастаниях гамма-фона во время осадков можно найти в предыдущих наших работах [3-5]. В данной статье основное внимание уделяется исследованию вариаций естественного рентгеновского излучения.

1. Комплексная система мониторинга

В ПГИ на станции СКЛ в Апатитах система мониторинга радиационного фона включает стандартный нейтронный монитор (НМ) 18-НМ-64, бессвинцовую секцию нейтронного монитора (БСНМ), сцинтилляционный спектрометр на основе кристалла NaI(Tl) (ССК) для измерения низкоэнергичного рентгеновского излучения, детектор заряженной компоненты. Также в систему включены датчики давления, температуры и осадков. В Баренцбурге установлены НМ 18-НМ-64, ССК, датчики давления и температуры. Привязка к точному времени на обеих станциях производится с помощью приемника GPS. Данные об осадках на этой станции берутся из метеорологического источника [6]

Рабочим элементов сцинтилляционных спектрометров является кристалл NaI(Tl) диаметром 6 см и толщиной 2 см. Прибор был ранее разработан в ПГИ и применялся для измерений аврорального рентгеновского излучения на аэростатах в стратосфере [7]. Регистрация в интегральных каналах >20 и >100 кэВ позволяет получать непрерывную оценку интегрального спектра рентгеновского излучения.

Детектор заряженной компоненты собран на газоразрядных счетчиках СТС-6. Счетчики располагаются в два горизонтальных ряда по 8 штук в ряду. Между рядами проложена пластина алюминия толщиной 5 мм. В каждом ряду счетчики включены по схеме "ИЛИ", выходы от рядов поступают на схему совпадений. Используется выход с верхнего ряда (детектор общего потока радиации или ДОП) и со схемы совпадений нижнего и верхнего рядов (МК). Несмотря на то, что СТС-6 имеют малую эффективность по отношению к рентгеновскому излучению, верхний ряд регистрирует общий поток заряженной и электромагнитной компонент. Схема совпадений импульсов от верхнего и нижнего рядов позволяет выделить только энергичную заряженную компоненту, т.е. мюоны и электроны.

Для измерения интенсивности осадков используется метод обратного рассеяния ИК-излучения каплями дождя. Датчик изготовлен в ПГИ лабораторией атмосферы Арктики. Он не калиброван в абсолютных единицах, используется только для качественных оценок интенсивности осадков.

2. Суточная вариация в различных видах излучений

Вариации потоков радиации в нейтронной и мюонной компонентах хорошо изучены [8]. Они обусловлены как глобальными геофизическими факторами (вращение Земли, геомагнитная активность), так и локальными (температурная и барометрическая вариации). Вариации имеют как периодический характер

(суточная, 27-дневная), так и аperiodические. Вначале необходимо исследовать влияние на естественный фон рентгеновского излучения у поверхности земли изменения давления, чтобы в дальнейшем вносить поправки в вариации и устранять влияние барометрического эффекта. Методика определения барометрического эффекта описана в [9]. По этой методике на массиве данных за 2009-2011 г.г. был вычислен барометрический коэффициент β для всех компонентов излучения, регистрируемых комплексной установкой: НМ, БСНМ, ССК, ДОР и МК. Как и предполагалось, найденная величина $\beta_{\text{НМ}} = \beta_{\text{БСНМ}} = 0.72 \text{ \%}/\text{мБ}$ соответствует [9], значение $\beta_{\text{МК}} = 0.18 \text{ \%}/\text{мБ}$, что близко к значению для мюонной компоненты, которая дает основной вклад в счет этого детектора. В то же время β для ССК оказался нулевым. Из предварительных оценок ожидалось, что БК будет мал, однако, точное вычисление дало нулевое значение. На рис.1 для примера приводится зависимость счета НМ и ССК от давления. Эта зависимость является основой для определения β . В то время как счет НМ показывает явную зависимость от давления, для ССК видим только статистический разброс точек. Большой разброс точек для ССК объясняется тем, что использован весь массив данных (и периоды возрастания также). Факт $\beta_{\text{ССК}} = 0$ указывает на локальную природу рентгеновского излучения: оно возникает в приземном слое атмосферы толщиной не более нескольких сотен метров. Этот результат подтверждает моделирование, выполненное в предыдущих работах [3-5]. Температурная вариация для нейтронной компоненты незначительна, и ею можно пренебречь [9]. Температурного коэффициента для ССК также не обнаружено.

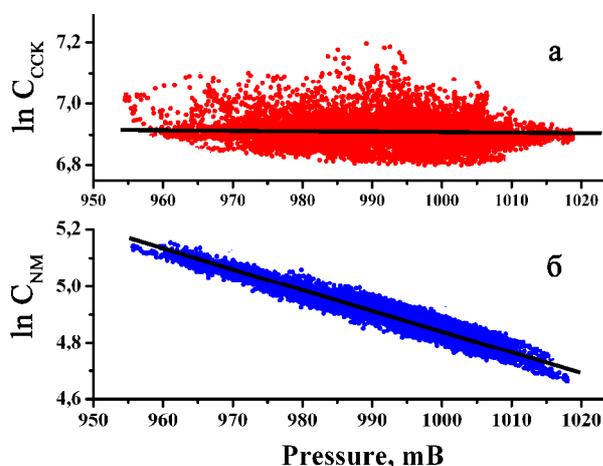


Рис. 1. Зависимости логарифма скорости счета ССК (а) и НМ (б) соответственно от давления. Наклон прямой (показана черным), фитирующей поле точек, определяет величину коэффициента β . Для ССК эта прямая располагается горизонтально, т.е. $\beta = 0$.

Итак, для исследования вариаций в различных компонентах излучения вначале в данных НМ, БСНМ, ДОР и БК было устранено влияние вариаций атмосферного давления, используя вычисленные барометрические коэффициенты. После этой предварительной обработки производился поиск вариаций. Всюду ниже применялся метод наложения эпох, описанный в [8].

За основу взята вариация на НМ, т.к. она хорошо выражена и изучена. Суточная вариация на НМ определяется анизотропией космических лучей в межпланетном пространстве и вращением Земли. За счет вращения направление приема радиации НМ в течение суток меняется, что и приводит к периодической вариации счета НМ [8]. Всего за период 2009-2011 было отобрано около полутора сотен дней в данных Апатитов и более сотни для Баренцбурга, когда вариация на НМ явно выражена и возрастания на ССК отсутствуют; данные БСНМ и ССК за эти же дни использовались для определения их собственных вариаций. Результаты представлены на рис.2. Суточная вариация на НМ и БСНМ имеет максимум на интервале 12-16 часов UT, что согласуется с положением асимптотических конусов приема станций вдоль направления оси анизотропии космических лучей. Амплитуды вариаций НМ на обеих станциях близки, а БСНМ примерно в полтора раза больше, чем на НМ, что также согласуется с прежними исследованиями. Новое и главное в полученном результате – наличие четкой суточной вариации рентгеновского фона в приземном слое атмосферы, происходящей в противофазе с вариацией на нейтронных мониторах в Апатитах. В Баренцбурге аналогичная суточная вариация едва выражена.

Как отмечалось выше, во время выпадения осадков наблюдаются возрастания рентгеновского фона. За все время зарегистрировано более двух сотен таких событий на ст. Апатиты. События различаются амплитудой, формой и длительностью. Однако, некоторые регулярности имеются. Так, в летний период амплитуда возрастаний достигает порой 50 %, уровень в 25 % является обычным, амплитуда возрастаний зимой не превышает 25 %. Также летние возрастания, как правило, относительно короткие: 4 - 8 часов, тогда как зимой наблюдаются возрастания, длящиеся сутки и более. Возрастания рентгеновского фона в Баренцбурге менее многочисленны, не имеют различий по времени года и не превосходят 20 %. При этом в данных НМ и БСНМ не отмечалось никаких существенных (превосходящих уровень среднестатистических флуктуаций) вариаций фона. Мы попробовали применить метод наложения эпох для выделения характерных вариаций в НМ и БСНМ, связанных с событиями – возрастаниями рентгеновского фона. Для этого все события были разделены сначала на короткие и длительные (не менее суток). В длительных наблюдается несколько возрастаний, наложенных друг на друга. Короткие в свою очередь разделены на большие (амплитуда более 20 %) и средние (до 20 %). Часть событий осталась не классифицирована и в обработку не включена. В каждую группу попало не менее полусотни событий. Для Баренцбурга деление

событий производилось только по длительности. За реперную точку в каждом событии принят момент максимума. Для каждого короткого события брался интервал в 20 часов с моментом максимума в середине (± 10 часов от максимума). Для длинных этот интервал равен ± 24 часа. Профили возрастных из одной группы накладывались друг на друга так, чтобы реперные точки совпадали. Данные всех прочих детекторов радиации, используемых в системе комплексного мониторинга, брались за те же самые отрезки времени и суммировались. Полученные средние профили возрастных рентгеновского фона и вариации в НМ и БСНМ показана на рис.3 для обеих станций. Для Апатитов использована серия больших возрастных. Серия средних возрастных дает аналогичную картину, только абсолютные значения 1.5-2 раза меньше.

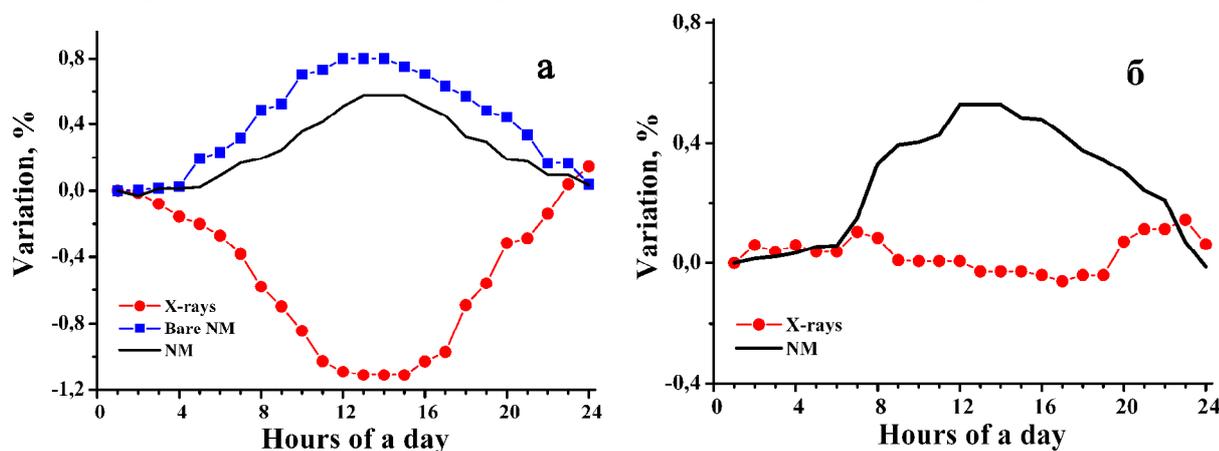


Рис. 2. Средние суточные вариации на станциях Апатиты (а) и Баренцбург (б). Показаны вариации на НМ (черная линия), БСНМ (квадратики) и ССК (кружочки).

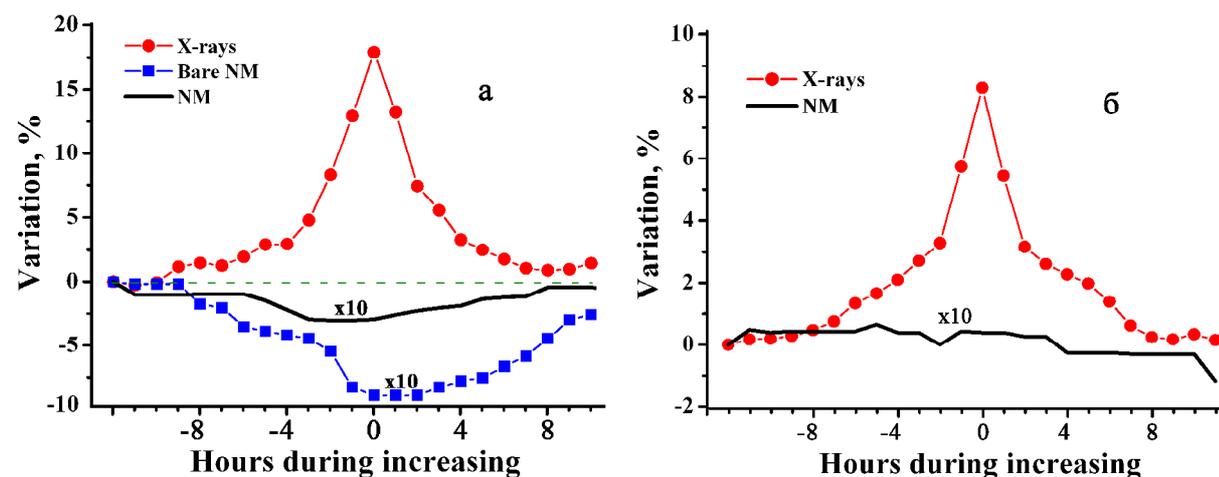


Рис. 3. Вариации счета НМ и БСНМ, связанные с возрастаниями рентгеновского фона (датчик ССК) в Апатитах (а) и Баренцбурге (б). Средние профили возрастных на ССК, связанные с осадками, показаны кружочками; приведены сопровождающие их вариации счета НМ (черная линия) и БСНМ (квадратики) мониторов. Для мониторов вариации умножены на 10.

В первую очередь внимание обращает тот факт, что все вариации в Апатитах выражены явно, тогда как в Баренцбурге суточная вариация едва заметна, а вариации НМ при возрастаниях в ССК отсутствуют вовсе. При этом отсутствие вариаций в Баренцбурге вполне объясняется известными фактами. В [3-5] было показано, что рентгеновское излучение в приземном слое имеет тормозную природу и происходит в результате взаимодействия энергичных электронов с атомами воздуха. Электроны возникают во вторичных каскадных процессах и от распада энергичных мюонов [10]. Поток электронов находится в равновесии с частицами, его порождающими. Средняя энергия генерации мюонов составляет около 50 ГэВ для первичной частицы; для каскадных процессов требуется еще большая энергия у первичной частицы. Средняя эффективная энергия первичной частицы для полярных НМ составляет 10-20 ГэВ. Известно также, что амплитуда суточной вариации с увеличением энергии первичных частиц убывает [8]. Поэтому вполне естественно ожидать малой суточной вариации в рентгеновском диапазоне по сравнению с НМ. В этом аспекте существенная суточная вариация рентгеновского фона, наблюдаемая в Апатитах и происходящая в противофазе с вариацией на НМ, является проявлением какого-то локального атмосферного эффекта.

В облаках всех типов, а также при наличии дымки, пыли, температурной инверсии или фронтального раздела возникают электрические поля напряженностью до единиц кВ/м на высотах от 500 до 2000 м [11, 12]. Причем, прямые измерения с самолетов в малооблачную погоду показали, что число случаев присутствия сильного электрического поля растет с увеличением широты места, достигая в Ленинградской области 43 % [11], однако, механизм этого явления не изучен. Если допустить, что подобный слой не менее часто возникает над Апатитами, то одним из возможных объяснений наблюдаемого эффекта будет в том, что увеличение потока космических лучей ведет к увеличению числа ионов в воздухе и возрастанию его проводимости, а это приводит к уменьшению электрического поля в указанном слое. Нами было показано в [5], что рентгеновское излучение в приземной слое воздуха обусловлено тормозным эффектом электронов, следовательно, изменение электрического поля, доускоряющего электроны приведет к изменению интенсивности рентгеновского излучения.

Подобный электрический слой не возникает над Баренцбургом по двум причинам. Во-первых, проводимость нижнего слоя атмосферы над морем всегда выше [12]. Во-вторых, темп счета ССК в Баренцбурге в три раза выше, чем в Апатитах, хотя детекторы одинаковые и калиброваны. Это означает, что поток энергичных электронов в атмосфере над Баренцбургом больше в три раза. Все это ведет к тому, что в нижней атмосфере не может образоваться слой с повышенной напряженностью электрического поля, т.к. происходит быстрая утечка заряда.

Вариации НМ, связанные с возрастаниями на ССК в Апатитах, обусловлены изменением толщины вещества над НМ. Дело в том, что возрастания на ССК происходят во время осадков. Оценка количества дополнительного вещества, появляющегося в атмосфере во время выпадения осадков (капли воды, находящиеся в воздухе) дает величину порядка 0.2-0.4 г/см². Водность облаков, их средняя толщина и скорость выпадения дождевых осадков взяты из [11]. Наличие вещества в количестве 0.4 г/см² над НМ приведет уменьшению скорости счета НМ на ~0.3 %, что хорошо согласуется с измеренным (см. рис.3). Для группы средних возрастных все детекторы (и ССК, и НМ, и БСНМ) показывают в 1.7-2 раза меньшие амплитуды. В Баренцбурге этого не наблюдается потому, во-первых, что амплитуда всех возрастных определяется как средняя, во-вторых, основной вид осадков там – это снег. Он создает в атмосфере меньшее количество дополнительного вещества, чем жидкие осадки, и эффект от него на НМ совсем мал.

Заключение

На основе данных комплексных установок мониторинга радиационного фона в Апатитах и Баренцбурге, исследованы несколько типов его вариаций. Во-первых, обнаружена существенная суточная вариация рентгеновского излучения в атмосфере в Апатитах, отсутствующая в Баренцбурге. Эта вариация находится в противофазе с вариацией на НМ и обусловлена изменением проводимости воздуха. Во-вторых, измерена вариация на НМ, вызываемая прохождением осадков над НМ. Величина этой вариации хорошо согласуется с оценками, сделанными на основании того, что во время осадков над НМ увеличивается количество вещества.

Отметим, что ощущается недостаток информации о физическом состоянии атмосферы на разных высотах над станциями. Во-первых, нет данных об электрическом поле в нижней тропосфере. Измерения электрических полей в облаках отрывочны, редки и относятся к умеренным широтам. Поэтому высказанные гипотезы о вариациях рентгеновского фона носят предварительный характер, а само явления нуждается в дальнейшем изучении.

Список литературы

1. de Mendonca R.R.S. et al. 2010, J. of Atm. and Solar-Terrestrial Physics, doi: 10.1016/j.jastp.2010.09.034.
2. Лидванский А.С., Хаердинов Н.С. Динамика космических лучей в электростатическом поле атмосферы и генерация частиц грозвыми облаками // Изв. РАН сер. физ. 2007. Т.71 №7 С.1060-1063.
3. Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Э.В. Вашенюк, Б.Б. Гвоздевский, Л.И. Щур. Вариации естественного гамма-фона во время выпадения осадков, не связанные с загрязнением атмосферы радионуклидами // Вестник КНЦ РАН, 2010. №2, 104-109.
4. Yu.V. Balabin, B.B. Gvozdevsky, E.V. Vashenyuk, A.V. Germanenko. Gamma-radiation connected to atmospheric precipitations // 38th COSPAR Assembly, Bremen, Germany, 18-25 July 2010, Abstract book.
5. B.B. Gvozdevsky, Yu.V. Balabin, A.V. Germanenko, E.V. Vashenyuk. On the origin of x-ray increases during precipitations // 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, 11-18 August 2011, paper № 863.
6. http://meteocenter.net/20107_fact.htm
7. Лазутин Л.Л. Рентг. излучение авроральных электронов и динамика магнитосферы. Л.: Наука. 1979. 201 с.
8. Дорман Л.И. Эксперим. и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука. 1975. 357 с.
9. Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука. 1972, 210 с.
10. Хаякава С. Физика космических лучей. Часть I. М.: Мир. 1973, 701 с.
11. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1984. 751 с.