

ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ОСАДКОВ

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

Аннотация. В настоящей работе продолжается исследование возрастных изменений естественного рентгеновского фона во время осадков, регистрируемых на станциях космических лучей в Апатитах. В результате обработки энергетических спектров, полученных во время возрастных изменений, и сравнения их со спектрами, полученными в ясную погоду, найдено, что собственно возрастание вызывается дополнительным потоком излучения с экспоненциальным спектром, накладывающимся на фоновое излучение, имеющее степенной энергетический спектр. В то время как вариации гамма-излучения в ясную погоду оказываются лишь вариациями интенсивности при сохранении формы спектра. Значение характеристической энергии в экспоненциальном спектре лежит в пределах 300-500 кэВ. Наблюдается отчетливый верхний энергетический предел излучения, сопровождающего осадки, который составляет 2-2.2 МэВ. Каких-либо линий, связанных с радионуклидами, не обнаружено во всем исследуемом диапазоне. На основе базы данных, содержащей сотни возрастных изменений, было определены средние профили возрастных изменений и осадков, их сопровождающих. Найдено, что максимум осадков опережает максимум рентгеновского излучения на 30-40 минут. Исследование барометрического эффекта в данных по гамма-излучению в приземной атмосфере показало, что он незначителен, однако, вполне измерим.

1. Введение

В течение ряда лет в ПГИ ведется мониторинг фона гамма-излучения в приземном слое атмосферы. Обнаружены возрастания фона, называемые далее событиями, сопровождающиеся осадками. Амплитуда их варьируется в пределах 5-50 %. Причем, события происходят на протяжении всего года. Практически всякий сильный дождь или снегопад вызывает возрастание фона. Подобный эффект дано обнаружен и изучен в умеренной и тропической зонах во время гроз. Считается, что там эти возрастания связаны с сильными электрическими полями между грозовыми облаками, доускоряющим заряженные частицы вторичных космических лучей (электронно-мюонная компонента) [1, 2]. Однако, трудно обосновать наличие таких сильных электрических полей в полярном регионе, тем более круглогодично. Такие же возрастания при осадках наблюдаются нами на Шпицбергене на станции Баренцбург, где установлен аналогичный детектор. Результаты измерений гамма-фона в Апатитах и Баренцбурге представлены в ряде работ [3-6]. В них даны подробные описания используемых установок для измерения гамма-фона в приземном слое атмосферы, а также рассказано о серии проведенных дополнительных экспериментов, назначение которых было выяснить природу и основные особенности наблюдаемых возрастных изменений. Перечислим кратко результаты:

1. Гамма-фон в приземном слое атмосферы имеет тормозную природу, в нем нет характеристических линий каких-либо радионуклидов естественного или антропогенного происхождения. Это же относится и к возрастаниям.
2. Радионуклиды отсутствуют в дождевой воде.
3. Верхняя энергетическая граница дополнительного излучения, вызывающего возрастания, не превышает 3-5 МэВ.
4. Возрастания происходят только в электромагнитной компоненте (гамма-излучение) и не затрагивают заряженную, т.е. электронно-мюонную компоненту.

В целях дальнейшего изучения этого явления в Апатитах на станции космических лучей ПГИ создан и поставлен на непрерывную регистрацию спектрометр гамма-излучения. Детектором служит кристалл $NaI(Tl)$ размером $\varnothing 150 \times 100$ мм. Дифференциальный спектр в диапазоне 200-4000 кэВ получается с помощью 4096-канального амплитудного анализатора. Время сбора одного спектра установлено в 30 мин. Таким образом, с дискретностью 30 минут непрерывно регистрируются спектры гамма-фона в приземном слое атмосферы. Увеличение времени сбора ограничивается тем, что длительность коротких возрастных изменений составляет 2-3 часа, и требуется иметь несколько измерений спектров за этот интервал времени. Устройство спектрометра, расчет отклика и калибровка описаны в [7] Здесь же остановимся подробно на результатах измерений спектров.

2. Возрастания гамма-фона в приземном слое атмосферы

Помимо дифференциального спектра ведется непрерывная регистрация потока гамма-излучения в интегральных каналах >20 , >100 , >200 и >1000 кэВ. Именно эти данные явно показывают увеличение

интенсивности излучения; они служат основой для проведения сравнений спектров в ясную погоду и во время событий. На рис.1а приведен пример типичного возрастания. Отчетливо видно, что по каналу детектора заряженной компоненты возрастания нет.

На основе большой базы данных, содержащей зарегистрированные события за 2009-2011 гг, найден средний типичный профиль возрастания и сопровождающих его осадков. Были отобраны 83 события, происшедшие в теплый период и имеющие умеренную длительность (не более 6 часов). Методом наложения эпох вычислен средний профиль возрастания и осадков, в качестве реперной точки установлен максимум осадков. Каждый профиль перед наложением нормировался по своему максимуму. В итоге получены средние профили осадков и возрастания гамма-фона (рис.1б). Примечательно принципиальное отличие полученных профилей и, особенно, их временное разнесение. Максимум осадков приходится на наибольший рост излучения, а его максимум достигается через 30-40 минут после максимума осадков. При этом спад возрастания растянут на 100-120 минут. В целом соотношение двух профилей соответствует ударному воздействию (осадки) и отклику инерционной системы (гамма-фон) со средним временем релаксации ~100 мин. При определенных условиях (короткие интенсивные осадки, чередующиеся с прояснениями) аналогичная форма профилей (острый пик осадков, крутой фронт и растянутый спад у гамма-фона) и их взаимное расположение наблюдаются непосредственно; конечно, точность измерения отдельного профиля гораздо хуже, чем приведенное здесь, однако, наличие таких профилей подтверждает, что вычисленные средние профили отражают действительное запаздывание возрастания от осадков.

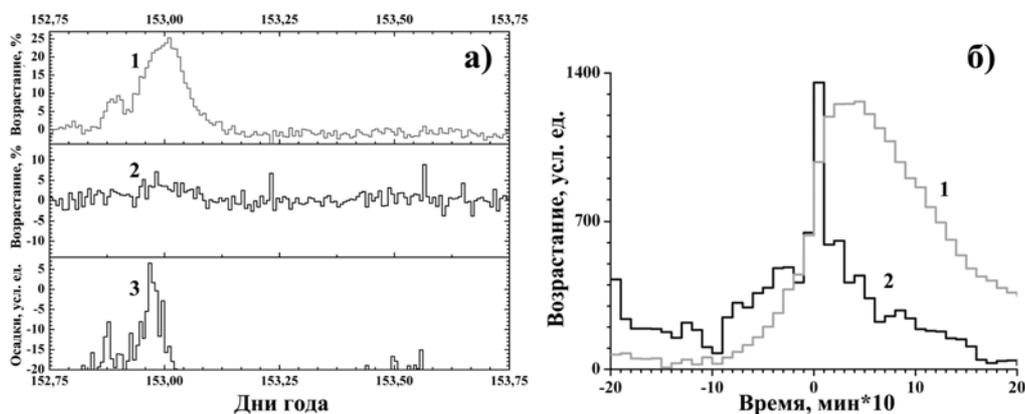


Рис. 1. а) Типичный профиль возрастания гамма-фона (1), детектора заряженной компоненты (2) и осадков (3). **б)** Средние профили осадков (2) и возрастаний (1), построенные методом наложения эпох.

3. Дифференциальные спектры возрастаний

Измерения дифференциальных спектров гамма-фона в ясную погоду показало, что спектр имеет в целом степенную форму с показателем $\gamma = -1.8$, значение γ постоянно. Около 1 МэВ наблюдается широкое утолщение. Одиночный спектр имеет неудовлетворительную статистическую точность, а усредненный за несколько часов, он вполне удовлетворителен по точности (см. рис.2а). Во время возрастания, если оно длится несколько часов, тоже можно получить с приемлемой точностью средний спектр. Визуально такой спектр отличается от фонового только подъемом на энергиях до 2.2 МэВ. Выше этой энергии спектры фона и возрастания совпадают полностью. Такой метод (усреднение спектров за несколько часов) позволяет обрабатывать лишь крупные события (амплитуда возрастания не менее 30 %) и длительностью от 4 часов, чтобы имелось с десятков измерений. Именно спектр такого события показан на рис.2а. Разница дифференциальных спектров фонового перед событием и во время события даст спектр собственно возрастания, т.е. излучения, добавляющегося к фону и вызывающего возрастания (далее просто спектр возрастания). Как видно из рис.2б, спектр возрастания имеет форму, близкую к экспоненциальной зависимости, и протягивается до энергий ~2 МэВ. Итак, аппроксимирующие функции имеют вид для:

$$\text{степенного спектра:} \quad I(E) = J_0 \cdot E^{-\gamma} \quad (1)$$

$$\text{экспоненциального спектра:} \quad I(E) = J_1 \cdot \exp(-E/E_0) \quad (2)$$

где E_0 – характеристическая энергия.

Именно включение измерителя дифференциального спектра в систему мониторинга гамма-фона позволило впервые выделить спектр возрастания и выяснить, что спектры фона и возрастаний отличаются видом функциональной зависимости: степенная для первого и экспоненциальная для второго. Столь принципиальное различие спектров указывает, по-видимому, на совершенно различные механизмы генерации излучений.

Однако возрастаний амплитудой более 30 % регистрируется немного. Было создано специальное программное обеспечение для обработки спектров и получения из них спектров возрастаний при меньших амплитудах. С его помощью обработаны несколько десятков событий с амплитудой от 5 %. Для каждого спектра возрастания находилась фитирующая экспоненциальная функция со своим значением J_1 и E_0 . На рис.3 представлены зависимости указанных величин от амплитуды возрастания. В то время как величина E_0 , на наш взгляд, не обнаруживает никакой связи с амплитудой возрастания, принимая среднее значение около 400 кэВ, величина J_1 линейно зависит от амплитуды. Связи E_0 и J_1 между собой не имеют. Из этого следует вывод, что осадки только запускают (или усиливают) некоторый процесс, генерирующий указанное излучение, но на сам процесс не определяют.

Следует отметить, что измерения дифференциальных спектров приземного гамма-фона в малых энергиях и определение спектра излучения, вызывающего возрастание при осадках, сделано впервые.

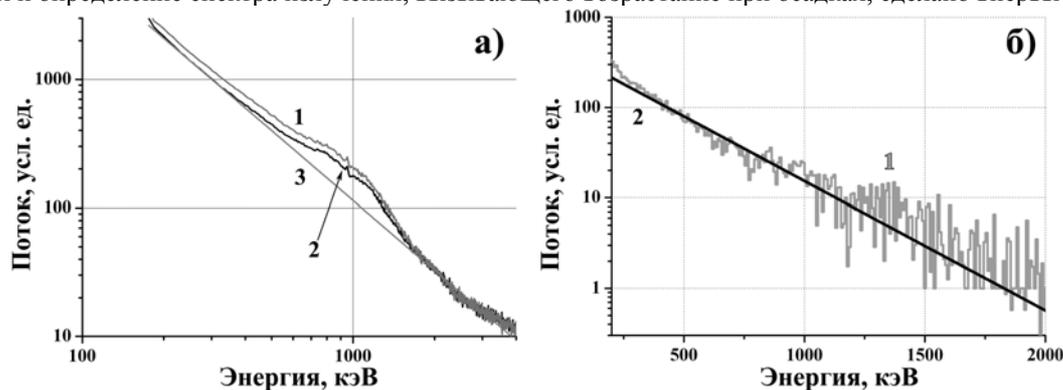


Рис. 2. а) Дифференциальные спектры: фона (2) и во время возрастания (1), а также аппроксимация (3) фонового спектра степенной функцией с показателем $\gamma = -1.8$. Видно, что спектр возрастания отличается от спектра фона до энергий ~ 2 МэВ, далее спектры сливаются. б) Разность спектров, являющаяся спектром собственно возрастания (1) и его аппроксимация (2) экспоненциальной функцией.

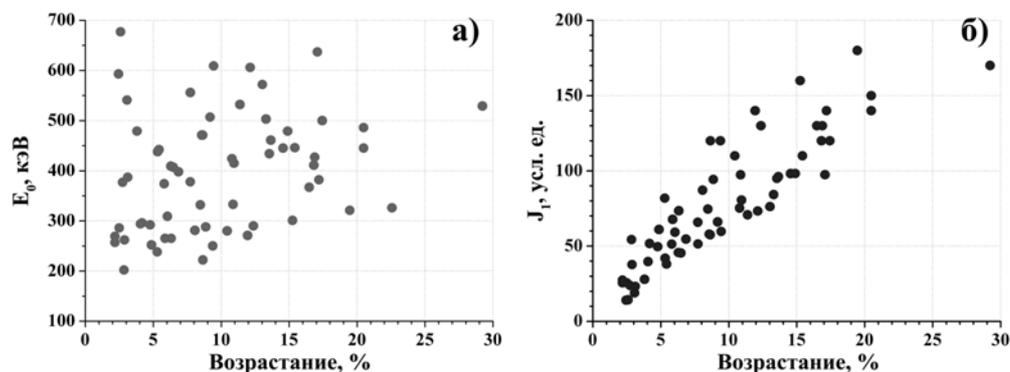


Рис. 3. а) Зависимость характеристической энергии E_0 спектра возрастания от амплитуды. б) Зависимость величины J_1 от амплитуды возрастания.

4. Барометрический эффект в разных энергиях гамма-фона

Регистрация излучения была бы неполной, если бы не велось измерение атмосферного давления. Это один из основных параметров состояния атмосферы. Ранее на основе измерений гамма-фона по интегральным каналам >20 и >100 кэВ были проведены исследования с целью определения барометрического коэффициента для гамма-излучения. Этот коэффициент мог бы дать важную информацию о его происхождении. Методика определения барометрического коэффициента для какого-либо вида излучения описана в [8]. Барометрические коэффициенты β для нейтронной и мюонной компонент излучения давно известны и составляют: $\beta_n = 0.72$ %/мБ и $\beta_m = 0.18$ %/мБ соответственно. Барометрический коэффициент для гамма-излучения в канале >100 кэВ оказался нулевым. С началом работы большого спектрометра представилась возможность измерить барометрический эффект в электромагнитной компоненте излучения в канале >200 кэВ и >1 МэВ.

Измерения показали, что в каналах >20 , >100 , >200 кэВ барометрический эффект не обнаруживается, соответственно, барометрический коэффициент равен 0. Однако, в канале >1 МэВ эффект обнаруживается (см. рис.4), но абсолютное значение его более чем на порядок меньше, чем β_n и равно $\beta_\gamma = 0.04$ %/мБ. С практической точки зрения таким барометрическим эффектом можно пренебречь, тем не менее наличествует тенденция: с увеличением энергии излучения барометрический коэффициент растет. Дело в

том, что барометрический коэффициент электронно-фотонной компоненты (в том числе гамма-кванты с энергиями от 10 МэВ и выше) в приземном слое составляет 0.36%/мБ [9]. Полное отсутствие барометрического эффекта для гамма-фона в малых энергиях указывает, что это излучение имеет локальное происхождение.

5. Заключение

В лаборатории космических лучей ПГИ ведется мониторинг приземного гамма-фона в диапазоне 20 кэВ – 4 МэВ. Регистрируются интегральные и дифференциальные энергетические спектры. Впервые выполнено измерение спектра излучения, вызывающего возрастание гамма-фона при осадках. Обнаружено, что возрастания вызваны дополнительным излучением с экспоненциальным спектром, в то время как фоновое излучение имеет степенной спектр.

В настоящее время недостаточно данных, чтобы составить законченную модель наблюдаемого эффекта (возрастания гамма-фона при осадках). Ведутся исследования, происходит накопление различной информации о свойствах приземного низкоэнергичного (до единиц МэВ) гамма-излучения. Дело в том, что вариации гамма-фона, связанные с осадками и происходящие в полярной атмосфере, были обнаружены нами, до этого их никто не наблюдал. Наиболее подходящим кандидатом для описания возрастаний гамма-излучения во время осадков является эффект доускорения энергичных заряженных частиц в электрических полях облаков. Однако, имеющиеся экспериментальные данные об электрических полях в дождевых (не грозовых) облаках не могут обеспечить наблюдаемый эффект в гамма-излучении.

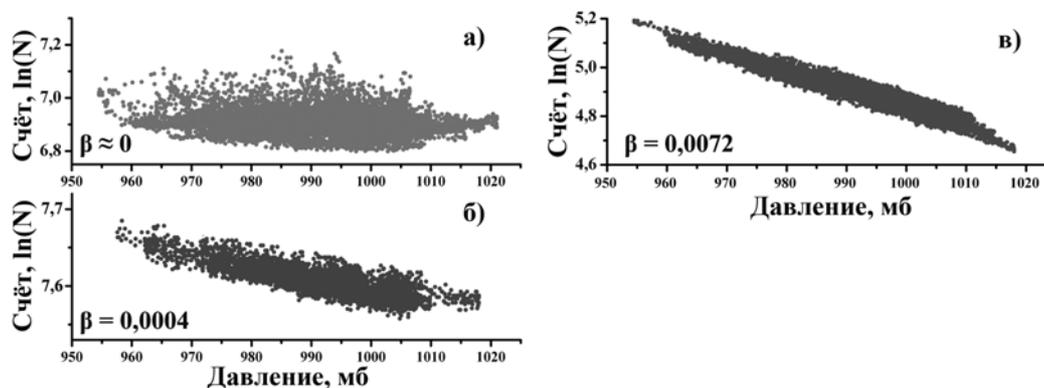


Рис. 4. Зависимость темпа счёта в различных каналах: **а)** – в канале >100 кэВ, **б)** – в канале >1 МэВ, **в)** – нейтронный монитор от атмосферного давления. По ОУ дан логарифм счёта. Нейтронный монитор приведен для примера, т.к. барометрический коэффициент для него хорошо известен. Большой разброс точек в канале >100 кэВ объясняется тем, что использована база данных, включающая вариации фона во время осадков.

Список литературы

- [1] R.R.S. de Mendonça, J.-P. Raulin, F.C.P. Bertoni, E. Echer, V.S. Makhmutov and G. Fernandez, Long-term and transient time variation of cosmic ray fluxes detected in Argentina by CARPET cosmic ray detector // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics V. 73. P. 1410–1416. 2011.
- [2] А.С. Лидванский, В.Б. Петков, Н.С. Хаердинов, Вариации интенсивности мюонов космических лучей вызванные грозовыми электрическими полями // Изв. РАН, сер. физ., 2004, т. 68, № 11, стр. 1605-1607.
- [3] А.В. Германенко, Ю.В. Балабин, Э.В. Ващенко, Б.Б. Гвоздевский, Л.И. Шур, Вариации естественного гамма-фона во время выпадения атмосферных осадков // Вестник Кольского научного центра РАН. Из-во КНЦ РАН, г. Апатиты, 2010, Вып. 3, стр. 104-109.
- [4] A.V. Germanenko, Yu.V. Balabin, B.B. Gvozdevsky, E.V. Vashenyuk, N.A. Melnik, Study of radiation related with atmospheric precipitations // Physics of Auroral phenomena, 34th annual seminar, 1-4 March, 2011, KSC RAS, Apatity, P.185-188.
- [5] A.V. Germanenko, Yu.V. Balabin, B.B. Gvozdevsky, L.I. Schur, E.V. Vashenyuk, High-energy photons connected to atmospheric precipitations. Astrophys. Space Sci. Trans., 2011, V.7, P. 471-475.
- [6] B.B. Gvozdevsky, Yu.V. Balabin, A.V. Germanenko, E.V. Vashenyuk, On the origin of X-ray increases during precipitations // Proc. of 32nd ICRC (China, Beijing, 11–18 August 2011), Id 863.
- [7] Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздевский, Э.В. Ващенко, Непрерывная регистрация спектров гамма-излучения в широком диапазоне энергий во время атмосферных осадков // настоящий сборник.
- [8] Л.И. Дорман Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 210 с., 1972.
- [9] Н.С. Хаердинов Исследование кратковременных вариаций вторичных космических лучей под действием электрического поля атмосферы во время гроз // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва, 2006.