

Возрастания гамма-фона при осадках: энергетический баланс и вопрос происхождения

БАЛАБИН Ю.В., GERMANENKO A.B.
Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Россия
balabin@pgia.ru, germanenko@pgia.ru

Аннотация

В работе представлены результаты исследования возрастных гамма-излучения, падающего из атмосферы на поверхность земли. Эти возрастания практически всегда сопровождаются осадками, однако, какие-либо радионуклиды в осадках не обнаружены. Выдвинуто обоснованное предположение, что возрастания гамма-фона обусловлены электрическими полями в дождевых облаках. Выполнена оценка величины напряженности электрического поля для предложенной модели.

Введение

Эффект влияния грозовой активности на поток мюонов отмечался на многих станциях космических лучей, например, [1] и ссылки там. Однако, вариации гамма-фона в приземном слое атмосферы, связанные с осадками и наблюдаемые во все сезоны в арктической зоне, впервые обнаружены нами. Во время осадков (как зимой в снегопад, так и летом при дожде) наблюдаются возрастания гамма-излучения (ГИ) до 50 % от уровня ясной погоды. К настоящему времени наблюдение ведутся уже свыше 4 лет, накоплена большая база данных – более 500 событий возрастных, проведены различные эксперименты, направленные на уточнение природы этих событий [2, 3]. В данной работе представлены результаты ряда новых экспериментов, проведенных на усовершенствованной системе регистрации ГИ в Апатитах. Основой системы является набор из трех приборов для измерения радиации, падающей из атмосферы: малого и большого сцинтилляционных детекторов (МСД и БСД) с кристаллами NaI(Tl) а также детектора заряженных частиц (ДЗЧ) на основе газоразрядных трубок. Параллельно с помощью БСД и многоканального амплитудного анализатора непрерывно ведутся измерения дифференциального спектра ГИ в диапазоне 0.2-5 МэВ. Форма спектра соответствует тормозному излучению, которое производится легкими энергичными частицами (далее для краткости – электронами), возникающими в толще атмосферы [4, 5].

Измерение спектров гамма-излучения

Созданный в лаборатории ПГИ измеритель дифференциального спектра мягкого ГИ значительно расширил возможности исследования. Он собран на основе БСД и цифрового анализатора импульсов. Кристалла БСД имеет размер $\emptyset 150 \times 100$ мм. Время накопления одного спектра составляет 30 минут, энергетический диапазон 0.2-5 МэВ. Измерения спектра проводятся непрерывно; параллельно ведутся измерения интегрального потока >20 кэВ, >100 кэВ, >200 кэВ и >1000 кэВ. Величина 30 мин выбрана как компромисс: с увеличением времени накопления точность измерения спектра растет, однако, длительность самых коротких возрастных составляет ~ 3 ч.

Дифференциальный спектр ГИ в ясную погоду (спектр фона) имеет степенную форму с показателем $\gamma \approx 1.8$, что близко к значению для тормозного излучения [4]. Дифференциальный спектр во время возрастных является суммой спектров фона и дополнительного излучения, и соответственно, можно получить собственно дифференциальный спектр

дополнительного излучения (ДСДИ). На рис.1 показаны профили потока ГИ и мюонов во время осадков и дифференциальные спектры ГИ перед возрастанием (фон) и в максимуме возрастания. Стоит отметить, что из рис.1а ясно: возрастание происходит в электромагнитной компоненте: на ДЗЧ возрастание сравнимо с флуктуациями, т.е. ничтожно малое. ДСДИ получается как разность между спектрами 2 и 1 на рис.1б. Для данного события ДСДИ показан на врезке рис.1б. Форма ДСДИ имеет экспоненциальную форму и верхний предел $\sim 2.5-3$ МэВ. Запишем эти зависимости:

$$\begin{cases} I_b(E) \sim J_0 E^{-\gamma} \\ I_{in}(E) \sim J_1 \exp(-E/E_0) \end{cases} \quad (1)$$

где $I_b(E)$ – аппроксимирующая функция дифференциального спектра фона, E – энергия гамма-кванта, γ – показатель спектра, $I_{in}(E)$ – аппроксимирующая функция ДСДИ, J_0 и J_1 – интенсивности потоков, E_0 – характеристическая энергия.

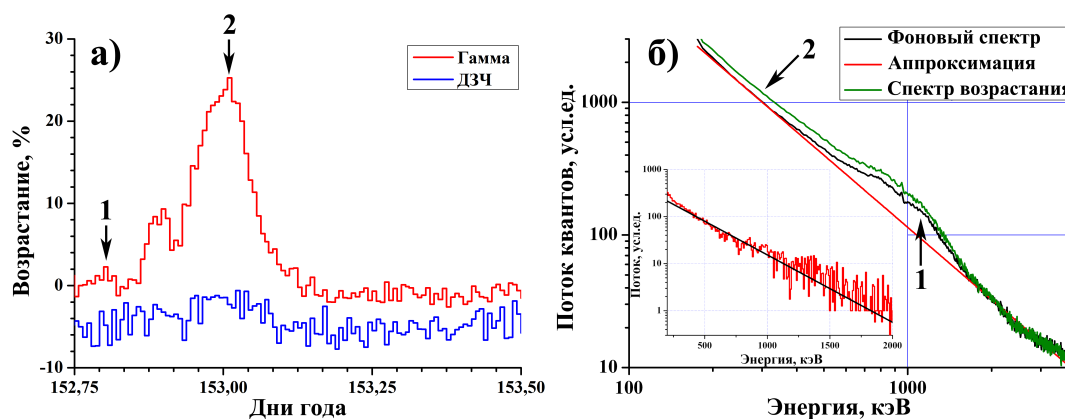


Рис. 1. а – типичные профили ГИ (красная линия) и ДЗЧ (синяя линия) во время осадков. ДЗЧ сдвинут вниз на 5 % для удобства восприятия. Стрелками с цифрами отмечены моменты измерения спектров. б – дифференциальные спектры ГИ перед возрастанием (фон) и в его максимуме. Красной линией показана аппроксимация степенной зависимостью фонового спектра. На врезке показан спектр ДСДИ в момент 2; красная линия – данные измерений, черная – его аппроксимация экспонентой.

За время работы измерителя дифференциального спектра ГИ зарегистрировано более сотни возрастаний амплитудой более 10 %. Для каждого из них около максимума определялся ДСДИ и вычислялась аппроксимирующая функция вида по (1). На основе полученных результатов проведено исследование связи параметров экспоненциального спектра ДСДИ с амплитудой возрастания, показанное на рис.2. Прослеживается линейная зависимость параметра J_1 от амплитуды, тогда как значение E_0 распределяется примерно равномерным облаком. Из этого можно сделать важный вывод: осадки влияют на активность процесса, генерирующего ДСДИ, но не на его физический механизм, так как ключевая спектральная характеристика E_0 сохраняется постоянной.

Возможная модель генерации дополнительного излучения при осадках

В прежних наших работах [2, 3] сделан вывод, что возрастания ГИ при осадках не связаны с какими-либо радионуклидами естественного или искусственного происхождения. Это было выяснено в ходе проведения наглядных экспериментов. Измерение дифференциальных спектров показывает, что возрастания обусловлены наложением на фон дополнительного ГИ в широком диапазоне энергий от 20 кэВ до 3 МэВ. Фоновое ГИ производится

вторичными космическими лучами в результате их взаимодействия с атмосферой [4, 5]. Естественно предположить, что появление дополнительного излучения при осадках также обусловлено этой причиной. Осадки изменяют условия взаимодействия вторичных космических лучей с атмосферой.

Известно, что внутри дождевых облаков существуют электрические поля [6, 7] напряженностью до 10 кВ/м. Появления дополнительного излучения при осадках связано с набором дополнительной энергии заряженными частицами в электрических полях облаков. Подобный эффект давно и уверенно наблюдается на мюонных детекторах [1, 8] при грозовой активности, когда напряженность электрических полей в облаке достигает сотен кВ/м. Такой силы электрические поля очень маловероятны в арктическом регионе, особенно в зимний период, в то время как возрастания наблюдаются круглый год при осадках в виде дождя или снега. Законы взаимодействия энергичных частиц с веществом [4] таковы, что тормозное излучение могут производить только легкие частицы: электроны и позитроны. Длина радиационных потерь t_0 не зависит от энергии частицы (потери пропорциональны энергии). В силу этого ускорение электронов в такой плотной среде, как нижняя атмосфера, невозможно, за исключением экстремально сильных полей (например, эффект убегающих электронов [9]). Нами предложен несколько иной механизм набора дополнительной энергии в электрическом поле в плотной атмосфере.

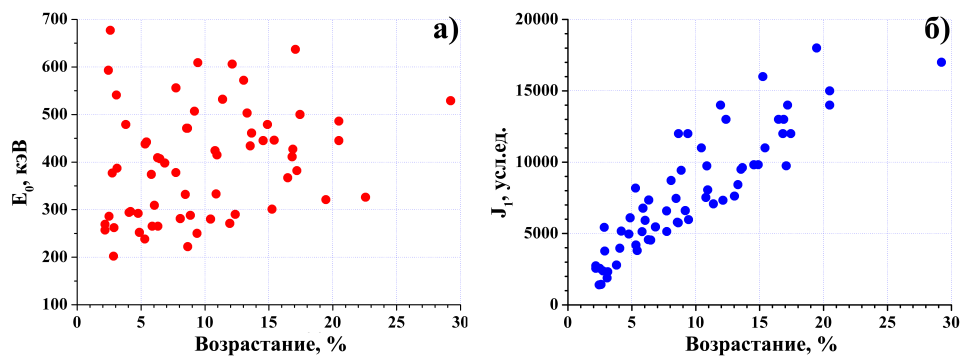


Рис. 2. Зависимости E_0 (а) и J_1 (б) ДСДИ от амплитуды возрастания

Мюоны рождаются во всей толще атмосферы [5]. Во время движения в атмосфере из-за своей большой массы мюон теряет энергию только на ионизацию, радиационные потери ничтожны. Величина этих потерь зависит лишь от плотности среды. Время жизни мюона 2.2 мкс, он распадается на три частицы, одной из которых является электрон (позитрон). При распаде полная энергия мюона передается этим частицам. В итоге электрону достается в среднем $1/3$ от полной энергии распавшегося мюона. Электрон, двигаясь в атмосфере, быстро (на дистанции t_0) тратит свою энергию на излучение тормозных квантов. Пусть мюон с полной энергией E_1 рождается в глубине атмосферы, скорость его направлена к земле. Через некоторое время он распадается на расстоянии X от точки рождения. Расстояние X определяется плотностью среды, временем жизни мюона и его скоростью (энергией). В момент распада энергия будет равна E_2 (величину $E_i = E_1 - E_2$ составят ионизационные потери, которые не зависят от энергии мюона), и в среднем $1/3 \cdot E_2$ достанется электрону. Если же на своем пути мюон пройдет облачный слой с электрическим полем, он приобретет дополнительную энергию ΔE :

$$\Delta E = e \cdot \chi \cdot L \quad (2)$$

где e – заряд электрона, χ – напряженность электрического поля в облаке, L – толщина облачного слоя. Величина ΔE при указанных в работе [6] полях и разумных значениях

толщины облаков составляет менее $0.01 \cdot E_2$, так что ΔE мало изменит длину пробега мюона, он распадется около той же точки X. (Опущенные за недостатком места расчеты на основе релятивистских уравнений движения показывают, что мюон с кинетической энергией 200 МэВ при возрастании энергии на dE увеличивает скорость как $\sim 0.035 \cdot dE$.) При распаде такого мюона достанется электрону также и треть дополнительной энергии ΔE , которая будет затем излучена в виде тормозных квантов. Отметим, что уже мягкие мюоны с кинетической энергией ~ 200 МэВ производят электроны выше характеристической энергии для воздуха, поэтому ионизационные потери электронов можно не учитывать [4]. Этот механизм переноса и преобразования энергии электрического поля в излучение снимает проблему набора энергии электронами в такой плотной среде, как приземной слой воздуха. Теперь оценим напряженность электрического поля в облаках, необходимую для создания среднего возрастания ГИ, исходя из баланса энергии. Зная размеры ДЗЧ, используемого в составе установки, и его скорость счета, вычислим абсолютный поток заряженных частиц n в нижнем слое атмосферы в данном месте. Основную часть его составляют мюоны [4, 5]. Экспериментально измеренные абсолютные значения ДСДИ позволяют вычислить полный поток энергии, вызывающей возрастание. Этот поток при 15 % возрастания составляет $\sigma = 23$ кэВ/(см²·с). Среднюю толщину облачного слоя дождевых облаков возьмем $L = 600$ м [7]. Поскольку выше мы приняли, что дополнительный поток энергии появляется в процессе набора мюонами энергии в электрическом поле облака, то верно:

$$\frac{\sigma}{n} = \frac{1}{3} e \cdot \chi \cdot L \quad (3)$$

откуда легко получается

$$\chi = \frac{3 \cdot \sigma}{n \cdot e \cdot L} \quad (4)$$

Все величины в правой части (4) определены, получаем $\chi \approx 2$ кВ/м. Множитель $1/3$ в (3) учитывает, что в среднем электрону достается треть от приобретенной мюоном энергии. Эта оценка сделана для идеальных условий, в реальных облаках и атмосфере возможно большее значение χ . Показательно, что эта оценка напряженности электрического поля в дождевых облаках близка к значениям, полученным прямыми измерениями (типичное значение $2 \div 5$, порой до 10 кВ/м [6]), при этом не превосходит их!

Заключение

Предложен реальный физический механизм, объясняющий возрастания ГИ при осадках. На его основе сделаны оценки напряженности электрического поля в облаке, необходимые для генерации возрастаний с наблюдаемыми амплитудами. Эти оценки находятся в хорошем согласии с экспериментальными измерениями электрических полей в дождевых облаках.

Литература

1. Лидванский А.С., Хаердинов Н.С. Динамика космических лучей в электростатическом поле атмосферы и генерация частиц грозowymi облаками // Изв. РАН сер. физ. Т. 71. № 7. С. 1060-1062. 2007.
2. Germanenko A. V., Balabin Yu. V., Vashenyuk E. V., Gvozdevsky B. B. High-energy photons connected to atmospheric precipitations // *Astrophys. Sp. Sci. Trans.* 2011, 7, pp 471-475.
3. Gvozdevsky B. B., Balabin Yu. V., Germanenko A. V., Vashenyuk E. V. On the origin of X-ray increases during precipitations // <http://galprop.stanford.edu/elibrary/icrc/2011/papers.html#0863>

4. *Гайтлер В.* Квантовая теория излучения. М.: ИЛ, 492 с. 1956.
5. *Хаякава С.* Физика космических лучей. Часть 1. М.: Мир, 701 с. 1973.
6. *Rust W.D. and Trapp R.J.* Initial balloon soundings of the electric field in winter nimbostratus clouds in the USA // *Geophys. Res. Lett.* V. 29. P. 1959-1962. 2002.
7. *Чальмерс Дж. А.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоиздат, 420 с. 1974.
8. *de Mendonça R.R.S., Raulin J.-P., Bertoni F.C.P., Echer E., Makhmutov V.S. and Fernandez G.* Long-term and transient time variation of cosmic ray fluxes detected in Argentina by CARPET cosmic ray detector // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 73. P. 1410-1416. 2011.
9. *Гуревич А.В., Зыбин К.П.* Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // *УФН.* – Т. 171. – №11. 2001. С. 1177-1199.

Gamma background increase during precipitation: its origin and energy balance

Balabin Yu.V., Germanenko A.V.

Polar Geophysical Institute of RAS, Apatity, Russia

Thunderstorm effect on a muon flux is a well known phenomenon and was observed at many stations. Nevertheless, we were the first to find gamma background increase in the near ground layer of the atmosphere associated with precipitation and observed during all seasons in the Arctic region. This paper presents the results of new experiments on the improved detection system for gamma radiation in Apatity. The system consists of three units measuring radiation coming from the atmosphere: a small and a large scintillation detectors with NaI(Tl)crystals and a charged particle detector on the basis of Geiger-Muller counter. Measurements of gamma radiation differential spectrum in the range of 0.2-5 MeV are continuously carried out by the large scintillation detector and a multichannel pulse-height analyzer. During precipitation (during snowfall in winter or rain in summer) the increase of gamma radiation up to 50% is observed. The increases correspond to differential spectrum change of gamma radiation in the range up to 3 MeV. There is no increase in the charged component at the same time. The results of a series of experiments show, that in the observed gamma background variations, their initial source is muons, generated in the atmosphere from cosmic rays and having high penetrability. Here the muons themselves do not participate in Bremsstrahlung due to their big mass. During precipitation muons get additional energy when passing through cloud electric fields. Via muon decay additional energy is partially transferred to electrons, than via Bremsstrahlung it is converted to electromagnetic form. Energy balance was calculated from the measured additional radiation flux: during gamma background increase the flux increases by 23 keV.cm.squ.s. Such energy flux will be provided when field intensity in a cloud is about 3.6 kV/m. This estimation is in a good agreement with the numerous measurements of the electric field in clouds: 2-5 kV/m.