

УДК 537.53

КРАТКОВРЕМЕННЫЕ ВОЗРАСТАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ ВНУТРИ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫЕ ДЕТЕКТОРАМИ ИЗЛУЧЕНИЙ В ВЫСОТНОМ ПУНКТЕ ТЯНЬ-ШАНЬСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ СТАНЦИИ

А. Л. Щепетов¹, К. А. Аргынова², Л. И. Вильданова¹, Т. К. Идрисова²,
Б. М. Искаков², В. В. Жуков¹, С. А. Мамина¹, Н. О. Садуев³,
Т. Х. Садыков², В. А. Рябов¹

На Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН (ТШВНС) исследованы события, связанные с кратковременными возрастаниями скорости счета гамма-квантов в энергетическом диапазоне десятки кэВ – единицы МэВ, и электронов с энергией порядка нескольких МэВ, представляющие собой типичные проявления эффекта эмиссии жестких излучений во время гроз (thunderstorm ground enhancement, TGE). Измерения проводились во время близкого прохождения грозовых облаков с помощью гамма-детекторов и детекторов заряженных частиц, которые располагались на высотном пункте регистрации, 3750 м н.у.м. Спектры излучений, связанные с электрическими процессами в атмосфере, измерены непосредственно в пространственной области их генерации в грозовых облаках на максимуме интенсивности излучения в событиях TGE. В ряде случаев в дифференциальном спектре гамма-излучения наблюдался пик в области ~500 кэВ, который может быть интерпретирован как сигнал, соответствующий аннигиляции позитронов, образующихся при каскадных процессах ускорения частиц в грозовом облаке.

Ключевые слова: грозовые облака, потоки электронов, гамма-излучение, энергетический спектр, аннигиляционная линия позитронов.

Во многих экспериментальных исследованиях последних двух десятилетий, посвященных атмосферной физике высоких энергий, было обнаружено явление превыше-

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ryabov@lebedev.ru.

² Университет Сатпаева, ТОО “Физико-технический институт”, 050032 Казахстан, Алматы.

³ Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Институт Экспериментальной и теоретической физики, 050040 Казахстан, Алматы.

ния потока заряженных частиц (электронов) высоких энергий и локального гамма-излучения над его обычным фоном, которое происходит в пространственной области грозových облаков. Относительная амплитуда таких возрастаний интенсивности колеблется в пределах от нескольких десятков до тысяч процентов, а их продолжительность может составлять от единиц секунд до нескольких минут. Диапазон энергии частиц, которые регистрировались в моменты возрастаний, составлял около (0.1–10) МэВ для гамма-квантов и (10–100) МэВ для электронов. Во многих случаях такие возрастания излучения предшествовали, но не совпадали по времени с последующей молнией, и прекращались в момент близлежащего грозového разряда. При описании подобных явлений в научной литературе наибольшее распространение получил термин “наблюдаемое на поверхности земли возрастание эмиссии излучений во время гроз” (thunderstorm ground enhancements, TGE) [1].

В настоящее время принято считать, что появление потока электронов высоких энергий связано с эффектом пробоя на убегающих электронах [2] – ускорением заряженных частиц в грозových облаках при условии, когда энергия, приобретаемая электроном под воздействием внешнего электрического поля, начинает превышать потери на его взаимодействия с окружающим веществом. В свою очередь, эмиссия гамма-излучения обусловлена тормозным излучением ускоренных электронов. Определяющую роль в формировании событий TGE, которые наблюдались в наземных экспериментах, играет нижний положительно заряженный слой в грозových облаках, который может формироваться на высотах меньших, чем область основного отрицательного заряда в середине облака, и обеспечивает ускорение электронов в направлении к земной поверхности.

Существенную модификацию модели пробоя на убегающих волнах составляет эффект положительной обратной связи, который заключается в значительном повышении интенсивности генерируемых в облаке жестких излучений, которое возникает благодаря позитронам, рожденным при образовании электрон-позитронных пар энергичными гамма-квантами [3]. В электрическом поле грозového облака позитроны ускоряются в направлении, противоположном потоку электронов, и образуют на своем пути электроны ионизации, которые оказываются затравочными частицами для последующих каскадов ускоренных электронов и гамма-квантов, генерирующих другие электрон-позитронные пары. В результате множественность как электронов, так и позитронов растет экспоненциально, что приводит к значительному увеличению суммарного потока гамма-излучения в области разряда. Равновесный разрядный ток, возникающий из-за постоянной генерации лавин ускоренных электронов, усиленный эффектом поло-

жительной обратной связи, способен компенсировать происходящее в грозовом облаке непрерывное разделение зарядов и обеспечить относительно длительное квазистатическое состояние, которое выглядит как эффект гамма-эмиссии или событие TGE.

Альтернативным механизмом, который может быть ответственным за дополнительный поток высокоэнергичных частиц и появление событий TGE, является эффект модификации энергетического спектра (МЭС) заряженных частиц под влиянием поля грозовых облаков [4]. Согласно этой модели при благоприятной ориентации атмосферного электрического поля как электроны, так и позитроны, возникающие в результате взаимодействия космических лучей в атмосфере, могут приобретать дополнительную энергию, что приводит к увеличению их времени жизни и длины затухания в атмосфере, а также к увеличению интенсивности регистрируемого излучения. Благодаря механизму МЭС события TGE могут формироваться даже в тех случаях, когда напряженность поля в грозовом облаке оказывается ниже минимального критического значения, необходимого для реализации пробоя на убегающих электронах.

За более чем двадцатилетнюю историю на детекторном комплексе ТШВНС получен целый ряд новых экспериментальных данных об излучениях, сопровождающих молниевые разряды [5, 6]. Особенностью комплекса является его способность исследовать гамма-излучение и потоки электронов непосредственно внутри грозовых облаков [7]. Специально был создан высотный пункт размещения детекторов на гребне горного хребта, на высоте ~ 3700 м над уровнем моря, и на ~ 400 м выше среднего уровня станции. Во время гроз этот пункт часто оказывается погруженным в глубину облаков, так что регистрация различных излучений возможна на расстояниях порядка нескольких десятков метров от области их генерации в молниевых разрядах. Нижний энергетический порог измерений составляет (20–30) кэВ для гамма-квантов и (1–2) МэВ для ускоренных электронов. В этом состоит существенное отличие данной работы от других наземных экспериментов, в которых детекторы располагались на расстояниях порядка нескольких километров от активной области грозового облака, а пороги регистрации гамма-квантов и электронов составляли, соответственно, несколько сотен кэВ и десятков МэВ.

Для регистрации гамма-излучения на высотном пункте применяются сцинтилляционные детекторы, которые построены на основе сопряженных с фотоумножителем цилиндрических кристаллов NaI (Tl) и работают в режиме счета отдельных квантов. Амплитудный анализ выходных импульсов позволяет восстановить энергетический спектр детектируемого излучения. Для этого сигналы с выхода детектора поступают

на ряд дискриминаторов с последовательно увеличивающимися порогами срабатывания. Каждый раз, когда амплитуда сцинтилляционной вспышки превышает заданный порог, соответствующий канал дискриминатора формирует стандартный импульсный сигнал, интенсивность которого определяется с помощью цифровых пересчетных схем. Фиксированная длительность сигналов составляет ~ 10 мкс, что сопоставимо с временем высвечивания сцинтиллятора. Энергетическая калибровка используемых детекторов проводилась с помощью набора радиоактивных источников гамма-излучения, а их эффективность для различных диапазонов энергии гамма-квантов определялась путем моделирования на основе пакета Geant4.

Регистрация ускоренных электронов производится с помощью телескопа совпадений, который состоит из пары детекторов заряженных частиц со сцинтиллятором, состоящим из пластин полистирола размером $1 \times 1 \times 0.01$ м³. Согласно результатам измерений с радиоактивными источниками, вероятность регистрации релятивистских электронов одиночным сцинтиллятором составляет около 0.95–0.99, в то время как она ничтожно мала (< 0.01) для гамма-квантов с энергией, не превышающей несколько МэВ. В телескопической установке, которая используется на высотном пункте, два сцинтилляционных детектора установлены горизонтально один над другим внутри деревянного контейнера, толщина крыши которого составляет ~ 1 г/см². Толщина дополнительного поглощающего материала, находящегося между сцинтилляторами, составляет ~ 40 г/см². В итоге, импульсные электрические сигналы, которые поступают от верхнего детектора установки, соответствуют прохождению релятивистских электронов с энергией не менее (2–3) МэВ, а сигналы совпадения импульсов от верхнего и нижнего сцинтилляторов означают прохождение в направлении, близком к вертикальному, электрона с энергией не менее (80–100) МэВ.

Во время гроз мониторинг интенсивности всех поступающих от детекторов высотного пункта импульсных сигналов ведется непрерывно, с временным разрешением 1 с. Детекторы высотного пункта использовались для регистрации излучений внутри грозовых облаков на протяжении трех летне-осенних сезонов в 2016, 2017 и 2018 г.г. В результате было зарегистрировано несколько десятков событий с характерным кратковременным возрастанием скорости счета гамма-квантов в энергетическом диапазоне десятки кэВ – единицы МэВ, которые можно интерпретировать как типичные проявления эффекта TGE. В ряде случаев, наряду с ростом гамма-излучения, были обнаружены также и возрастания интенсивности потока электронов, регистрировавшихся с энергетическим порогом порядка нескольких МэВ. В силу ограниченного пробега уско-

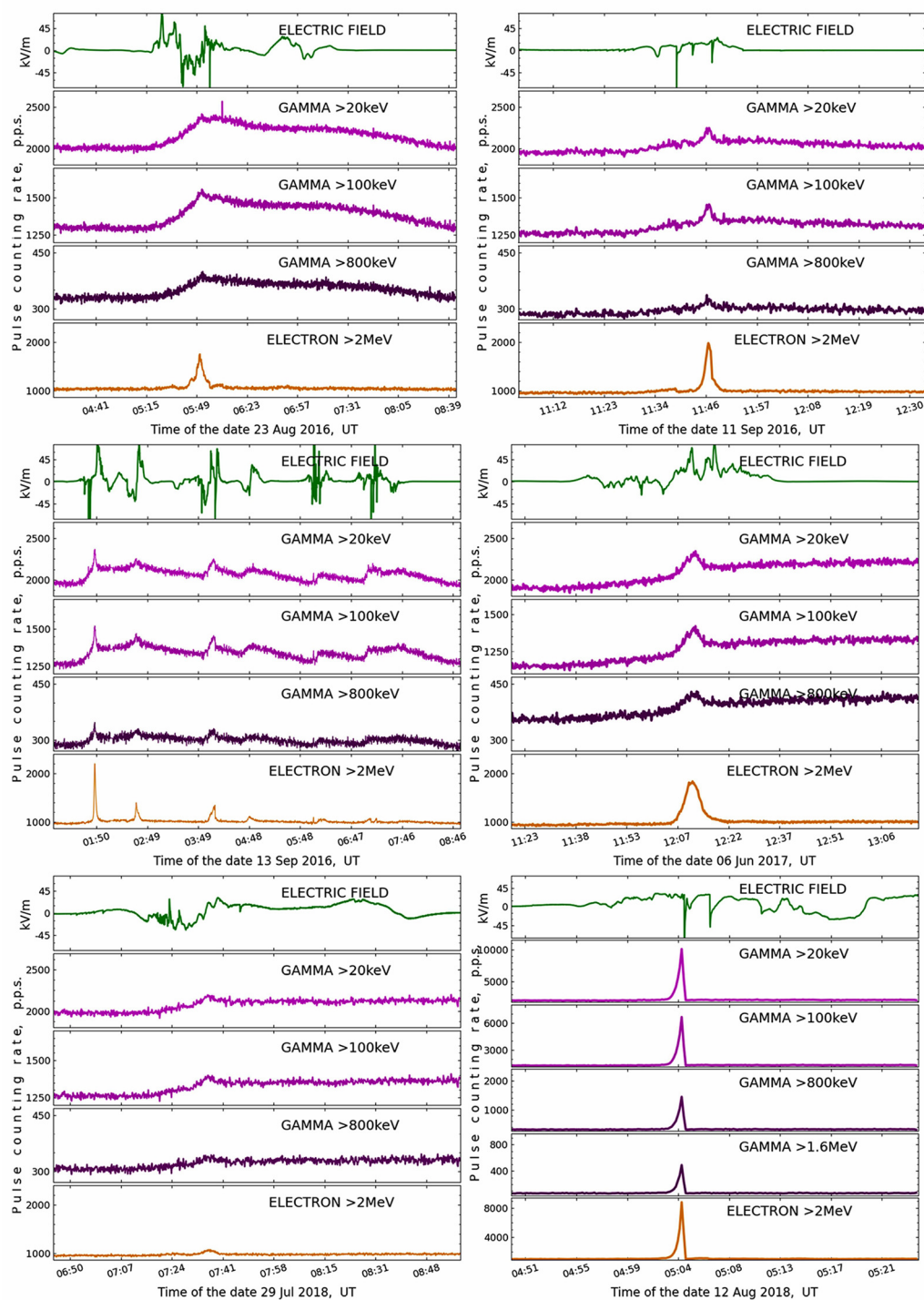


Рис. 1: События TGE с зарегистрированным сигналом от релятивистских электронов, наблюдавшиеся в грозовых облаках над Тянь-Шаньской станцией.

ренных электронов в воздухе, можно предполагать, что все события TGE, в которых непосредственно наблюдался сигнал от МэВ-ных электронов, соответствуют случаям прохождения активной зоны грозового облака на минимальном расстоянии, не более нескольких десятков – сотен метров от высотного пункта. Результаты мониторинга скорости счета в различных детекторных каналах для нескольких характерных событий TGE, представлены на рис. 1.

Как следует из распределений ELECTRON рис. 1, характерная длительность сигнала от развивающихся в грозовом облаке электронных лавин составляет несколько минут, что сопоставимо со временем перемещения грозового облака над детектором. В большинстве наблюдавшихся случаев относительная амплитуда возрастания скорости счета заряженных частиц на пике события TGE по отношению к ее фоновому уровню варьирует в пределах (10–100)%, и лишь в аномально мощном событии 12 августа 2018 г. она достигает $\sim 780\%$. Что касается распределений GAMMA, относящихся к данным по скорости счета в различных энергетических каналах гамма-детектора, то в большинстве случаев относительно кратковременный пик скорости счета в них накладывается на гораздо более медленное, с характерным временем спада порядка часа, возрастание интенсивности гамма-излучения, природа которого существенно иная и не связана непосредственно с процессом генерации релятивистских заряженных частиц в грозовом облаке. Согласно преобладающим в настоящее время представлениям, “медленные” возрастания гамма-фона отражают рост концентрации в приземном слое воздуха различных радиоактивных компонент, прежде всего ^{222}Rn , вызванный выпадением осадков (дождь, град, снег), обычно сопровождающих развитие грозовых процессов.

Интегральные распределения скорости счета, регистрировавшиеся с секундным временным разрешением в нескольких каналах гамма-детектора, соответствующих ряду порогов по энергии регистрируемых гамма-квантов, позволяют рассчитать дифференциальный энергетический спектр гамма-излучения внутри грозовых облаков для любого момента времени. Такие спектры, относящиеся к моментам пиковой амплитуды показанных на рис. 1 событий TGE, представлены на рис. 2. При расчете этих спектров учитывалась эффективность используемого сцинтилляционного детектора по отношению к регистрации гамма-квантов различной энергии, а из исходных значений скорости счета сцинтилляционных сигналов на пике событий TGE вычитались фоновые уровни, соответствующие данным невозмущенного периода, непосредственно предшествующего началу роста интенсивности.

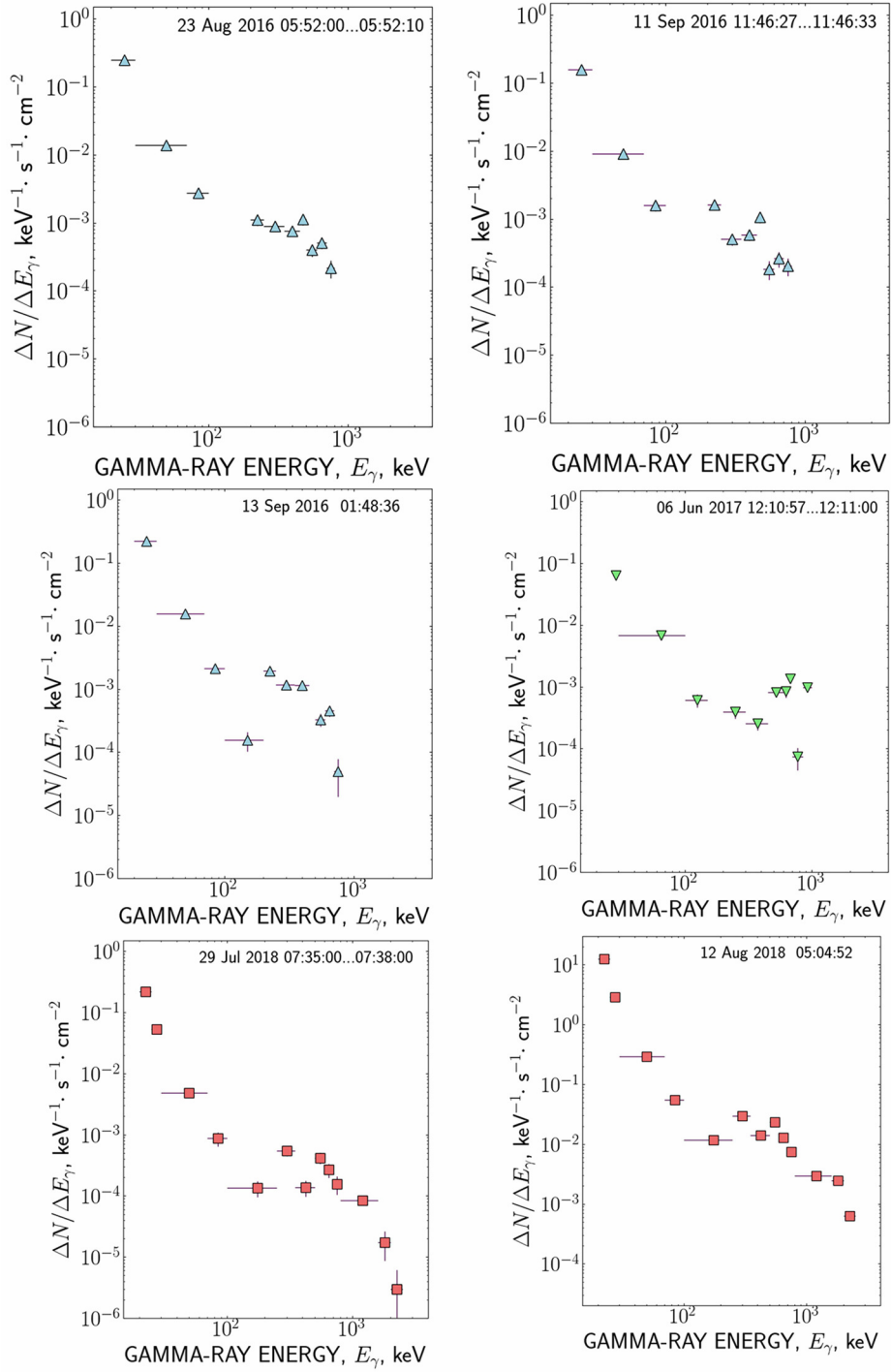


Рис. 2: Энергетические спектры гамма-квантов, зарегистрированных на максимуме интенсивности излучения в событиях TGE.

Представленные на рис. 2 спектры соответствуют экспоненциальному распределению $f(E_\gamma) \sim E_\gamma^{-\beta} \cdot \exp(-E_\gamma/\varepsilon)$, которое используется для аппроксимации спектра гамма-излучения, генерируемого в воздухе при развитии электронно-фотонной лавины с учетом эффекта комптоновского рассеяния. Соответствующие этим спектрам оценки параметров $\beta \approx (0.5-0.8)$ и $\varepsilon \approx (1.5-2)$ МэВ согласуются со значениями, которых следовало бы ожидать при генерации потоков гамма-излучения на основе механизма МЭС.

Важную особенность представленных на рис. 2 спектров составляет наличие в каждом из них локального максимума интенсивности в области энергии гамма-квантов $E_\gamma \approx (450 - 600)$ кэВ. Этот максимум можно интерпретировать как проявление спектральной линии 511 кэВ, соответствующей процессу аннигиляции позитронов. Сигнал о наличии заметного количества позитронов на пике событий TGE служит важным свидетельством в пользу реальности эффекта релятивистской обратной связи, играющего важную роль при развитии лавины ускоряемых электрическим полем грозового облака заряженных частиц. Еще одним источником позитронов может оказаться β^+ -распад короткоживущих изотопов, которые образуются в грозовых облаках благодаря фотоядерным реакциям под воздействием интенсивного потока гамма-излучения из развивающейся электронно-фотонной лавины.

Помимо аннигиляционной линии, в некоторых спектрах на рис. 2 замечен еще один максимум в области меньших энергий, $E_\gamma \approx (200 - 300)$ кэВ. Эта особенность может отражать вклад в суммарный спектр со стороны дочерних ядер-продуктов распада изотопа ^{222}Rn , концентрация которого в приземном слое атмосферы возрастает при осадках, сопровождающих прохождение грозовых облаков.

Работа выполнена при поддержке гранта № AP09258896 “Исследование проникающей компоненты космических лучей по данным гибридного ионизационно-нейтронного калориметра “Адрон-55” с инфраструктурой сцинтилляционных детекторов” Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Chilingarian, G. Hovsepyan, T. Karapetyan, et al., Phys. Rev. D **101**, 122004 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevD.101.122004.
- [2] A. Gurevich, G. Milikh, R. Roussel-Dupre, Phys. Lett. A **165**, 463 (1992). [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(92\)90348-P](https://doi.org/10.1016/0375-9601(92)90348-P).
- [3] J. Dwyer, Geophys. Res. Lett. **30**, 2055 (2003).

- [4] A. Chilingarian, B. Mailyan, L. Vanyan, Atmos. Res. **114-115**, 1 (2012).
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.008>.
- [5] A. V. Gurevich, A. M. Almenova, V. P. Antonova, et al., Phys. Rev. D **94**, 023003 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevD.94.023003.
- [6] A. Shepetov, V. Antonova, O. Kalikulov, et al., Atmos. Res. **248**, 105266 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105266>.
- [7] A. P. Chubenko, A. L. Shepetov, V. P. Antonova, et al., Nucl. Instrum. Methods A **832**, 158 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.068>.

Поступила в редакцию 6 февраля 2023 г.

После доработки 2 марта 2023 г.

Принята к публикации 3 марта 2023 г.