

УДК 537.53

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ В СОБЫТИЯХ ГАММА-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ И РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРОННОГО СИГНАЛА В ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ НА ТЯНЬ-ШАНЕ

А. Л. Щепетов, Л. И. Вильданова, В. В. Жуков, С. А. Мамина, В. А. Рябов

В работе представлены результаты анализа излучений, которые регистрировались на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН в событиях гамма-электронной эмиссии (TGE) во время гроз. Выявлены различия в пиковой интенсивности излучения, которая фиксировалась при одновременном наблюдении событий TGE на различных высотах. Определены энергетические спектры гамма-излучения в событиях TGE. В нескольких событиях TGE, наряду с ростом потока гамма-квантов, были зафиксированы резкие кратковременные возрастания скорости счета в чувствительном к тепловым нейтронам сцинтилляторе, находящемся на верхнем детекторном пункте, на высоте 3900 м, который во время гроз оказывался в глубине грозового облака.

Ключевые слова: гамма-электронная эмиссия, энергетический спектр гамма-излучения, грозовое облако, молниевый разряд, нейтронный сигнал.

Основная цель измерений интенсивности радиационного фона в приземной атмосфере во время гроз заключается в исследовании эффектов ускорения заряженных частиц-электронов электрическим полем грозовых облаков и выявлении роли таких частиц в процессе формирования молнии. В частности, особый интерес представляет возникновение гамма-излучения во время так называемых событий гамма-электронной эмиссии (thunderstorm gamma emission или thunderstorm ground enhancements, TGE) – относительно продолжительных, вплоть до нескольких десятков секунд, явлений, при которых в электрическом поле грозового облака поддерживается квазистационарный

процесс ускорения частиц, и которые, как правило, но не всегда, завершаются молниевым разрядом [1, 2]. При наблюдении таких событий непосредственно в глубине грозовых облаков интенсивность ускоренных электронов и связанного с ними тормозного гамма-излучения может возрасти в несколько раз, вплоть до порядка по сравнению с предшествующими грозе ее фоновым значением [3, 4].

Интерес представляют как общая частота наблюдения событий гамма-электронной эмиссии, так и их корреляции с величиной локального электрического поля и метеорологическими параметрами (температура воздуха в приземном слое атмосферы, атмосферное давление, количество выпадающих осадков, относительная влажность воздуха и т. п.), а также характерные размеры активной зоны ускорения частиц в грозовом облаке. Востребованы данные о характерных распределениях пиковой интенсивности гамма-излучения во время максимума эмиссии и энергии (энергетический спектр) излучаемых гамма-квантов. Созданный к настоящему времени комплекс непрерывно работающих, синхронизированных по времени, распределенных в пространстве и расположенных на различных высотах гамма-детекторов Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС), дает возможность проводить исследование всех этих характеристик.

На протяжении грозового сезона 2024 г. удалось зафиксировать 16 событий гамма-электронной эмиссии. Записи временного хода интенсивности радиационного фона во время этих событий образуют банк TGE, который хранится для последующей обработки в общей базе данных ТШВНС, наряду с информацией о напряженности локального электрического поля и метеорологических параметрах, которые также непрерывно измеряются на территории станции.

Временной ход скорости счета в гамма-детекторах ТШВНС, регистрировавшийся во время нескольких событий TGE на протяжении летнего грозового сезона 2024 г., представлен на графиках рис. 1, которые построены с временным разрешением 10 с, и данные для которых были получены в измерениях, проводившихся одновременно на трех высотах: 3340, 3750 и 3900 метров над уровнем моря. В измерительных пунктах, которые размещаются на каждом из этих уровней, установлены детекторы, построенные на основе сцинтилляционных кристаллов NaI(Tl) цилиндрической формы с площадью $\varnothing 110 \times 100$ см² и снабженные электроникой для регистрации скорости счета гамма-квантов одновременно в ряде энергетических диапазонов, начиная с минимального порога (20–30) кэВ и вплоть до (3–4) МэВ. При этом на уровне 3340 м, который соответствует средней высоте Тянь-Шаньской станции, находятся два пункта размещения гамма-детекторов, *C* и *R*, разделенные расстоянием ~ 160 м.

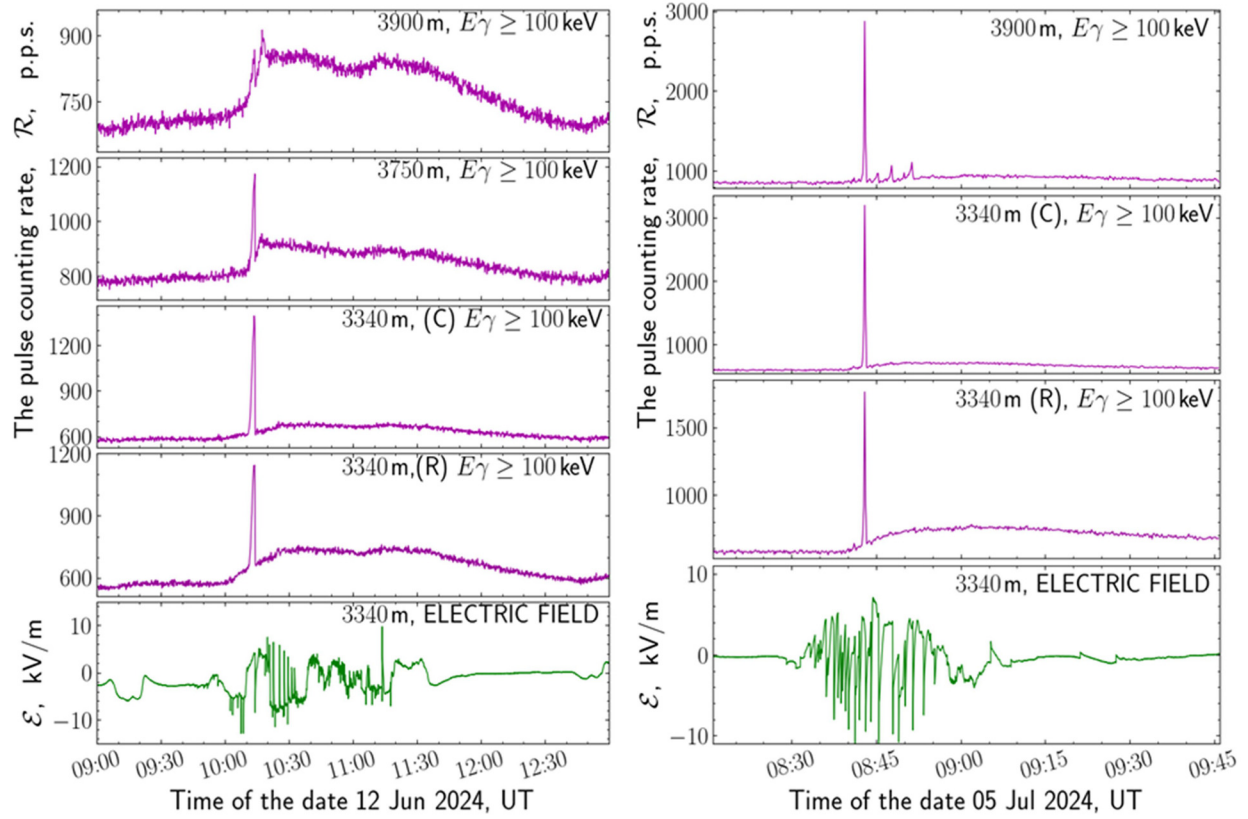


Рис. 1: Временной ход скорости счета в детекторах гамма-излучения при прохождении гроз 12 июня и 5 июля 2024 г. Данные по скорости счета в гамма-детекторах представлены с временным разрешением 10 с, измерения электрического поля – с разрешением 1 сек. Измерения скорости счета приведены в количестве импульсных сигналов в секунду (p.p.s.).

Как следует из графиков рис. 1, характерная длительность событий TGE могла достигать нескольких десятков секунд, а относительное превышение скорости счета гамма-квантов на пике эмиссии варьировалось от нескольких десятков процентов до 200–300%. В большинстве случаев, таких как события 12 июня и 5 июля 2024 г. (рис. 1), развитие процесса эмиссии было прервано молниевым разрядом, который фиксировался по характерному отрицательному скачку электрического поля на уровне ТШВНС (3340 м н.у.м.).

Напротив, записи скорости счета в событиях 13 и 24 июня (рис. 2) имеют симметричную колоколообразную форму, что, по-видимому, соответствует непрерывному пересечению места расположения детекторов активной зоной грозового облака, в которой

поддерживались квазистационарные условия ускорения частиц. В подобных случаях ширина пика на временном графике скорости счета при сопоставлении ее со скоростью ветра в данный момент дает возможность оценить характерный поперечный размер активной зоны в горизонтальном направлении. Так, в случае события 13 июня его длительность, на уровне половины пиковой амплитуды, составляла ~ 3 минуты, что при наблюдавшейся в тот момент средней скорости ветра (7–8) м/с соответствует геометрическому размеру ~ 1500 м. Для события 24 июня аналогичные оценки составляют, соответственно, ~ 2 минуты, (2–3) м/с и ~ 300 м.

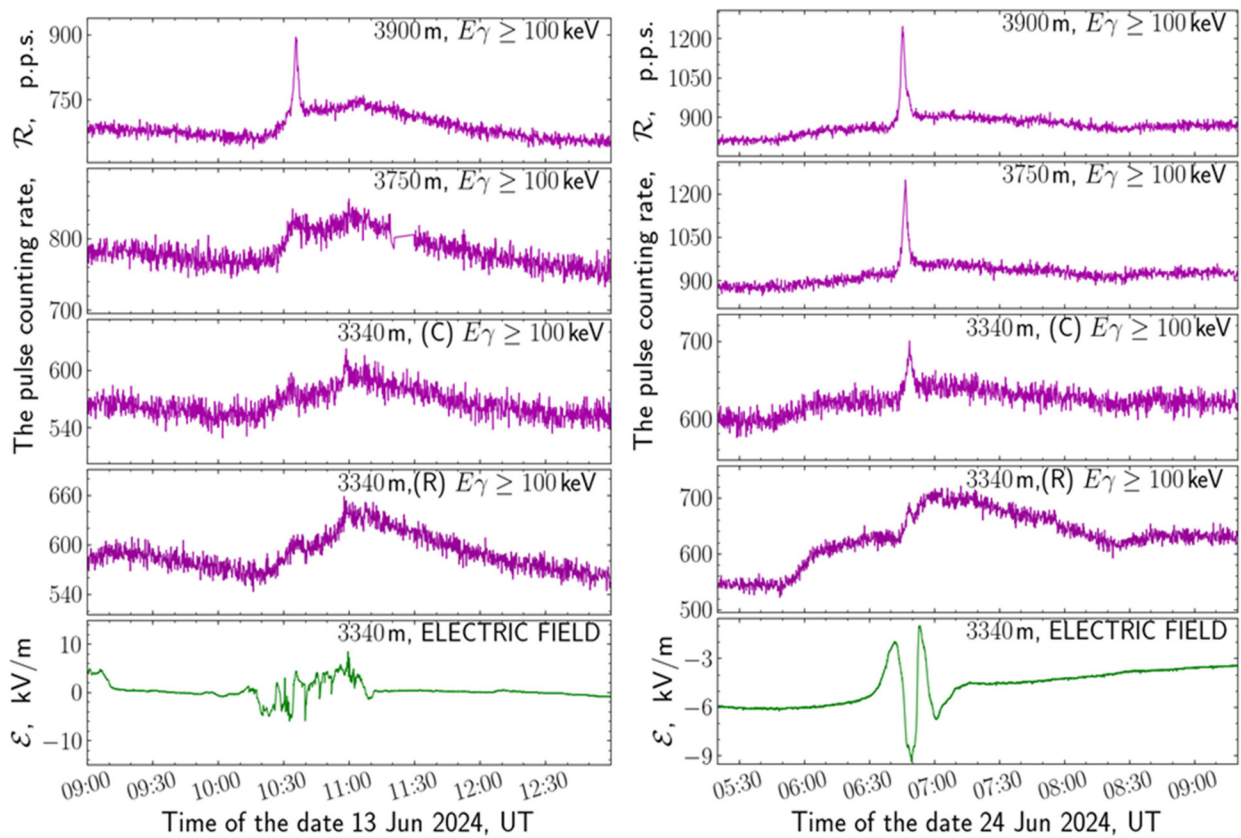


Рис. 2: Временной ход скорости счета в детекторах гамма-излучения при прохождении гроз 13 июня и 24 июля 2024 г.

Интересно также отметить различия в пиковой интенсивности излучения, которая фиксировалась во время событий эмиссии на разных уровнях наблюдения. Так, в событии 16 мая (рис. 3, слева) относительная амплитуда роста скорости счета на уровне 3900 м по отношению к предшествующему началу возрастания фону составляет $\sim 50\%$, а на уровне 3340 м не превышает (5–6)%. Обратное соотношение амплитуд возрастания

наблюдалось в событии 12 июня (рис. 1, слева): если на уровне 3340 м относительный рост составлял $\sim 100\%$, на высоте 3900 м он не превышает 10% . Наконец, в событиях 13 июня (рис. 2, слева) и 9 июля (рис. 3, справа) заметное возрастание потока гамма-квантов происходило только в самом верхнем пункте, на высоте 3900 м. Такое различие в наблюдаемых амплитудах возрастания означает, что характерный размер активной зоны грозового облака в вертикальном направлении сопоставим с разницей высот между пунктами размещения детекторов, то есть не превышает нескольких сотен метров.

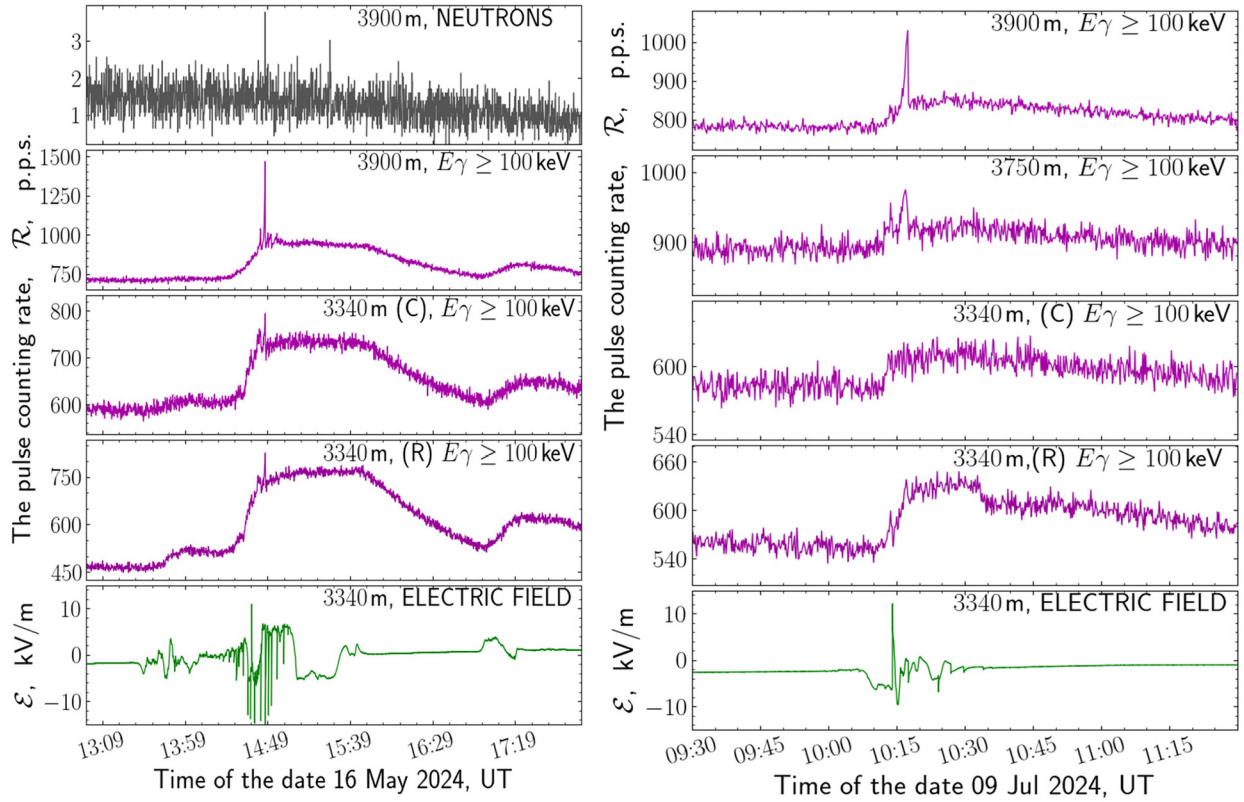


Рис. 3: Временной ход скорости счета в детекторах гамма-излучения при прохождении гроз 16 мая и 9 июля 2024 г.

Во время нескольких событий гамма-электронной эмиссии, которые наблюдались на протяжении летнего сезона 2024 г., наряду с ростом потока гамма-квантов были обнаружены резкие кратковременные возрастания скорости счета сигналов от чувствительного к тепловым нейтронам сцинтиллятора, который установлен на самом верхнем детекторном пункте на высоте 3900 м. При этом каких-либо особенностей во временном ходе интенсивности потока тепловых нейтронов, непрерывно регистрировавшегося в то же время с помощью газоразрядных нейтронных счетчиков на территории ТШВНС, на

уровне 3340 м обнаружено не было. Примеры таких возрастаний приведены на графиках, относящимся к событиям TGE 16 мая (рис. 3, слева), а также 16 июля и 23 августа на рис. 4. Как следует из этих данных, пиковое значение скорости счета нейтронных сигналов в подобных случаях может варьироваться от 3–5 до ~ 50 импульсов в секунду, что при фоновой скорости счета менее 1 с^{-1} соответствует кратковременному возрастанию среднего потока нейтронов в окружающей среде на 1–1.5 порядка его исходной величины, причем во всех случаях продолжительность такого возрастания не превышала минимального времени между последовательными измерениями интенсивности, составлявшего одну секунду. Эти данные могут представлять интерес с точки зрения активно обсуждавшейся ранее проблемы, связанной с генерацией избыточного потока нейтронов во время грозовой активности [5, 6].

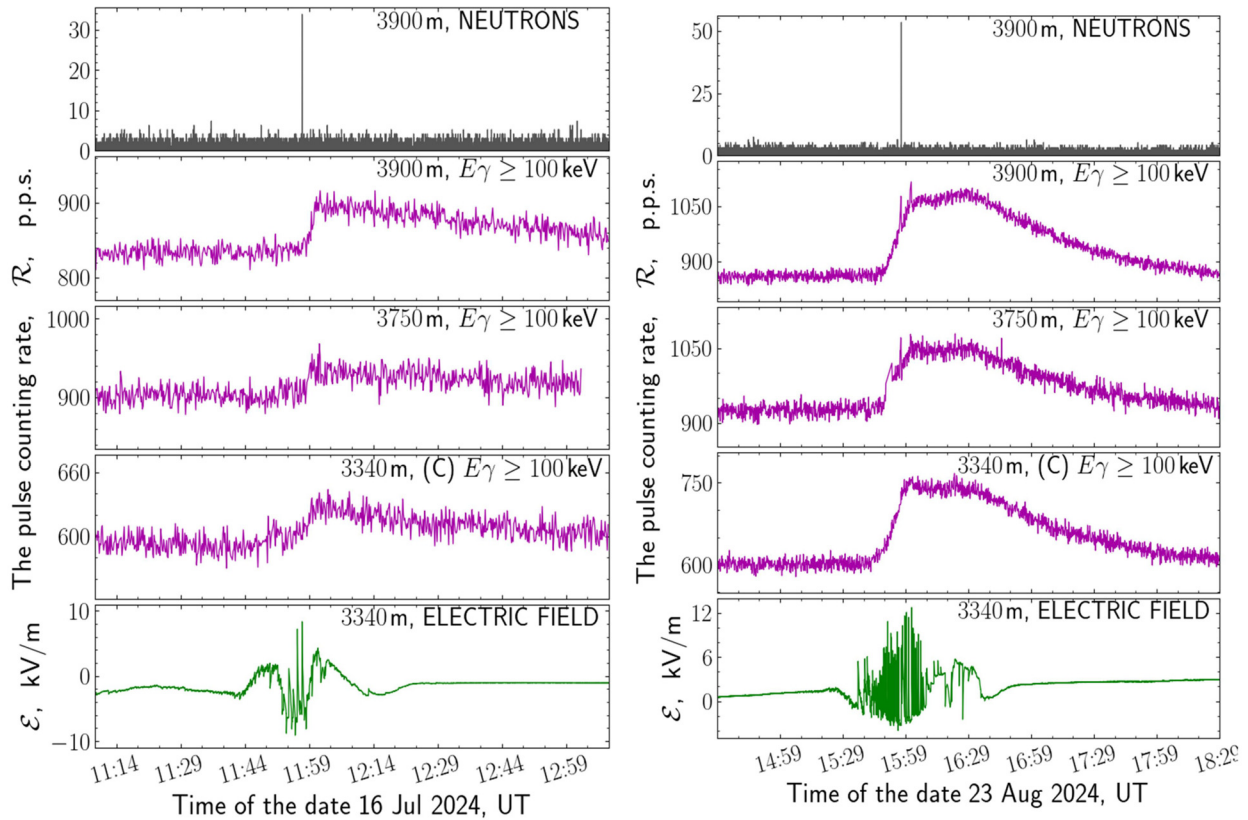


Рис. 4: Временной ход скорости счета в детекторах гамма-излучения при прохождении гроз 16 июля и 23 августа 2024 г.

Важные выводы о характеристиках процесса ускорения заряженных частиц в электрических полях грозowych облаков можно получить, рассматривая энергетический

спектр связанных с этими частицами тормозных гамма-квантов. Всю необходимую для расчета таких спектров информацию можно извлечь из записей временного распределения интенсивности гамма-излучения, которые делались во время событий TGE детекторами комплекса ТШВНС при нескольких значениях минимальной энергии регистрируемых гамма-квантов. Так, дифференциальный энергетический спектр гамма-излучения можно рассчитать на основе данных о скорости счета гамма-квантов, измеренной одновременно для ряда энергетических порогов, учитывая площадь чувствительного элемента-сцинтиллятора в каждом детекторе и эффективность регистрации в этом сцинтилляторе гамма-квантов различных энергий.

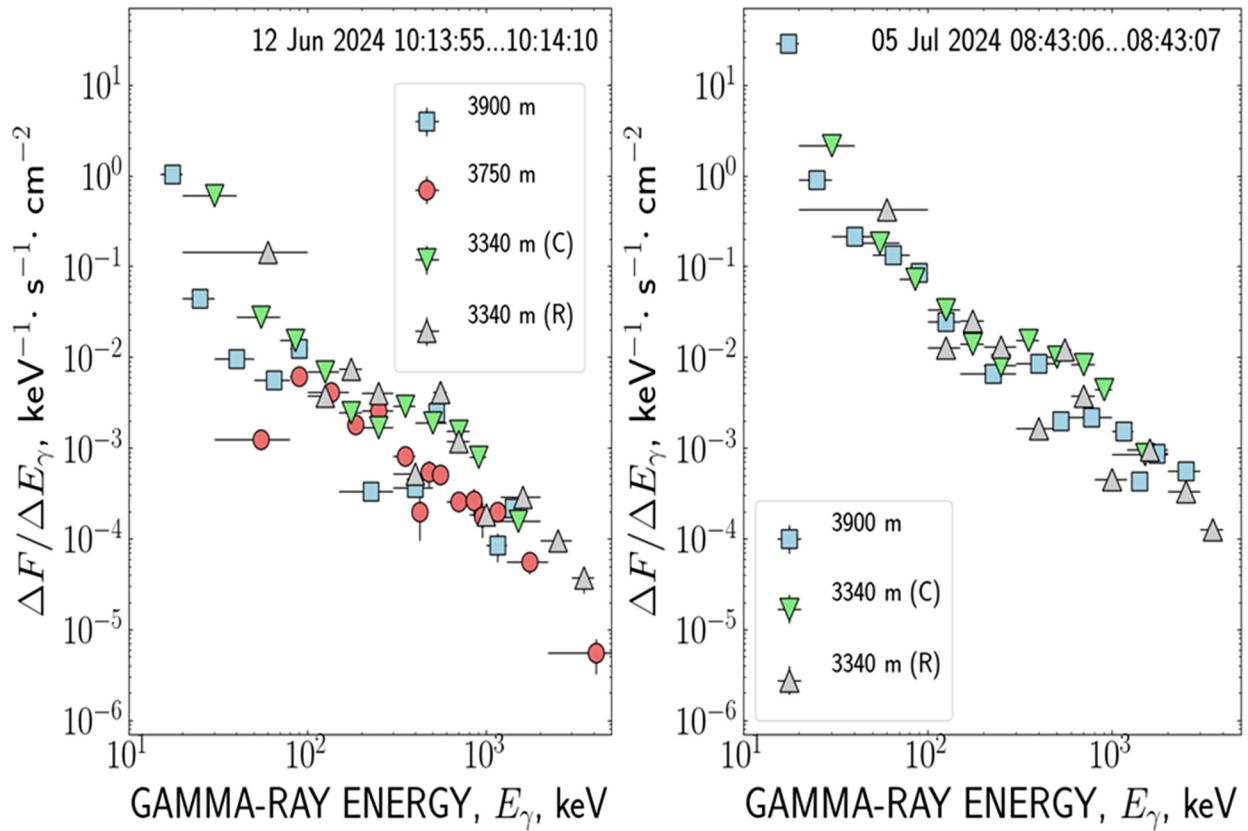


Рис. 5: Энергетические спектры гамма-излучения в максимуме событий гамма-электронной эмиссии, регистрировавшиеся на различных уровнях наблюдения. Фон вычтен.

Два примера подобных спектров, которые были получены для событий гамма-электронной эмиссии 12 июня и 5 июля 2024 г., показаны на рис. 5. В каждом из этих случаев по данным временных распределений фактически рассчитывались два энерге-

тических спектра: один непосредственно для момента, соответствующего пику эмиссии с точностью $\pm(2-3)$ с, второй, “фоновый”, спектр – для “спокойного” периода, который предшествовал началу связанного с прохождением грозовых облаков возрастания радиационного фона. Показанные на графиках рис. 5 распределения представляют собой разность между “пиковым” и “фоновым” спектрами. Как следует из этих графиков, общий вид спектров излучения, генерируемого в событиях гамма-эмиссии, соответствует степенному распределению с показателем -1.2 , и слабо зависит от уровня наблюдения.

Представленные в работе результаты анализа изменения интенсивности гамма-излучения в моменты событий гамма-электронной эмиссии, включая коррелированные случаи с генерацией кратковременных возрастных потоков нейтронов во время грозовой активности, расширяют понимание характерных особенностей процесса ускорения заряженных частиц в электрических полях грозовых облаков.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Joseph R. Dwyer, et al., Journal of Geophysical Research-Atmospheres **130**(2), article number e2024JD042193 (2025). DOI: 10.1029/2024JD042193.
- [2] A. Chilingarian, G. Hovsepyan, T. Karapetyan, et al., Physical Review D **107**, 102003 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevD.107.102003.
- [3] A. Shepetov, V. Antonova, O. Kalikulov, et al., Atmospheric Research **248**, 105266 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105266>.
- [4] А. Л. Щепетов, К. А. Аргынова, Л. И. Вильданова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **50**(4), 3 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623040073.
- [5] A. V. Gurevich, V. P. Antonova, A. P. Chubenko, et al., Physical Review Letters **108**, 125001 (2012).
- [6] A. V. Gurevich, V. P. Antonova, A. P. Chubenko, et al., Atmospheric Research **164-165**, 339 (2015). DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.06.004.

Поступила в редакцию 7 февраля 2025 г.

После доработки 4 марта 2025 г.

Принята к публикации 5 марта 2025 г.