
СВЯЗАННЫЕ С ОСАДКАМИ СОБЫТИЯ ВОЗРАСТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ ВТОРИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ: СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗ

PRECIPITATION-RELATED INCREASE EVENTS OF THE ELECTROMAGNETIC COMPONENT OF SECONDARY COSMIC RAYS: SPECTRAL ANALYSIS

Ю.В. Балабин *Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, balabin@pgia.ru***А.В. Германенко** *Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, alex.germanenko@gmail.com***Б.Б. Гвоздевский** *Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, gvozdevsky@pgia.ru***Е.А. Маурчев** *Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, maurchev1987@gmail.com***Е.А. Михалко** *Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, mikhalko@pgia.ru***Yu.V. Balabin***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, balabin@pgia.ru***A.V. Germanenko***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, alex.germanenko@gmail.com***B.B. Gvozdevsky***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, gvozdevsky@pgia.ru***E.A. Maurchev***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, maurchev1987@gmail.com***E.A. Mikhalko***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, mikhalko@pgia.ru*

Аннотация. Представлены результаты измерений дифференциальных спектров электромагнитного излучения в диапазоне 0.1–4 МэВ, возникающего в атмосфере как компонента вторичных космических лучей. Мониторинг спектров выполнялся в 2022–2023 гг. с помощью спектрометра на основе кристалла NaI(Tl). Основной целью измерений являлось определение спектральных характеристики электромагнитного излучения во время событий возрастания, когда поток электромагнитного излучения из атмосферы увеличивается на десятки процентов по отношению к среднему уровню. На основе тщательного анализа спектров многих десятков событий делается вывод: хотя линии естественных радионуклидов присутствуют в спектрах и вносят свою долю, их суммарный вклад в события возрастания составляет ~0.1 от полной энергии, приведенной при возрастании. Делается однозначный вывод, что эффект возрастания электромагнитного излучения при осадках не обусловлен наличием радионуклидов в осадках.

Ключевые слова: вторичные космические лучи, электромагнитное излучение, сцинтилляционный детектор, дифференциальный спектр, радионуклиды, возрастание.

Abstract. We report the measurement results of differential spectra of electromagnetic radiation in the range 0.1–4 MeV, which occurs in the atmosphere as a component of secondary cosmic rays. Spectral monitoring was performed using a spectrometer based on the NaI (TL) crystal in 2022–2023. The main purpose of the measurements was to determine spectral characteristics of the electromagnetic radiation during increase events, when the electromagnetic radiation flux from the atmosphere rises by tens of percent with respect to the background level. From a thorough analysis of the spectra of many dozens of events, we have drawn a conclusion that although the lines of natural radionuclides are present on the spectra and contribute their share, their total contribution to the increase events is ~0.1 of the total energy supplied during an increase. We unambiguously conclude that the effect of increasing electromagnetic radiation during precipitation is not due to the presence of radionuclides in precipitation.

Keywords: secondary cosmic rays, electromagnetic radiation, scintillation detector, differential spectrum, radionuclides, increase.

ВВЕДЕНИЕ

Детекторы космических лучей, расположенные на поверхности земли, регистрируют вторичные космические лучи (ВКЛ), образующиеся при взаимодействии первичных космических лучей с ядрами атомов воздуха. Первое взаимодействие частиц кос-

мических лучей происходит в верхних слоях атмосферы вплоть до высот ~10–15 км [Хаякава, 1974], далее вглубь атмосферы распространяются ВКЛ. Они состоят из нескольких компонент [Мурзин, 1988]. Нуклонную компоненту ВКЛ регистрируют нейтронные мониторы, мюонные телескопы чув-

ствительны к заряженной компоненте ВКЛ [Дорман, 1975]. Высокоэнергичная (сотни МэВ) электромагнитная компонента ВКЛ создает каскады легких частиц [Иваненко, 1972]. Низкоэнергичная (<100 МэВ) электромагнитная компонента ВКЛ сильно поглощается и рассеивается атмосферой. Например, длина пробега квантов с энергиями в единицы МэВ не превышает нескольких сотен метров [Григорьев, Мелихов, 1991], следовательно, все такие кванты, регистрируемые наземным прибором, образовались на высотах не более 1–2 км [Мурзин, 1988]. Это означает, что по всей толще атмосферы ВКЛ производят новые кванты электромагнитного излучения в результате распада короткоживущих частиц (мюонов, каонов, пионов) и тормозного излучения легких заряженных частиц [Хаякава, 1974; Мурзин, 1988]. Электромагнитная компонента (ЭМК) ВКЛ мало пригодна для исследования космических лучей, поскольку подвержена сильному влиянию атмосферы [Дорман, 1972], но именно поэтому она может оказаться неплохим индикатором метеорологических процессов в приземном слое атмосферы.

1. МОНИТОРИНГ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С 2009 г. на станции космических лучей в Апатитах учеными Полярного геофизического института (ПГИ) проводится мониторинг потока электромагнитного излучения, приходящего из атмосферы. Мониторинг ведется с помощью детекторов на основе сцинтилляционных кристаллов NaI(Tl) диаметром 65 мм и высотой 20 мм, разработанных в ПГИ для измерения потоков рентгеновского излучения [Лазутин, 1979]. Детекторы, калиброванные по линиям Am-241 (27 и 61 кэВ), размещены в свинцовых стаканах с толщиной стенок 50 мм и имеют поле зрения $\sim 150^\circ$ в виде конуса, обращенного основанием в зенит. Детекторы находятся в термостабилизированном боксе на чердаке здания. Над детекторами суммарно находится 0.8 г/см^2 железа и $\sim 2 \text{ г/см}^2$ древесины (железная кровля и доски), эти значения были использованы для расчета поглощения излучения в крыше здания [Григорьев, Мелихов, 1991]. Эффективность детектора была рассчитана с помощью программного пакета RUSCOSMICS [Германенко и др., 2019], на основе этого энергетический диапазон детектора принят 20–500 кэВ, хотя кристалл способен регистрировать излучение до 1 МэВ. Детекторы имеют несколько интегральных выходов, наиболее удобный и стабильный — канал >100 кэВ. Подробное описание комплекса для измерения потоков ВКЛ приведено в работе [Балабин и др., 2014].

После начала наблюдений очень скоро было обнаружено возрастание ЭМК при осадках. Далее для краткости мы называем возрастания ЭМК «событиями возрастания». Типичная амплитуда возрастания ЭМК составляет десятки процентов, хотя в отдельных событиях достигает 100 % от уровня непосредственно перед осадками. Возрастания наблюдаются

при любых осадках в жидкой (дождь, туман) или твердой (снег, ледяная пыль при сильных морозах) форме. Длительность возрастаний примерно соответствует длительности выпадения осадков: после прекращения осадков поток излучения постепенно возвращается к прежнему уровню. Известно, что в сильных электрических полях грозовых облаков происходит ускорение заряженных частиц, которые могут быть зарегистрированы наземными детекторами [de Mendonca et al., 2011; Миронычев, 2003; Muraki et al., 2004]. Кроме того, наблюдается эффект убегающих электронов [Gurevich et al., 1992; Gurevich, Milikh, 1999; Гуревич, Зыбин, 2001], которые создают тормозное излучение. В момент разряда молнии возникает также рентгеновское излучение от высокотемпературной плазмы в канале молнии [Dwyer et al., 2003, 2004]. Однако вышеперечисленные эффекты генерации рентгеновского и гамма-излучения возможны только при грозах, тогда как обнаруженные нами возрастания наблюдаются зимой и летом в Заполярье, где грозы очень редки, и только в электромагнитной компоненте. Размещение идентичных детекторов в других местах (на арх. Шпицберген, на Кавказе, в Тикси и др.) показало, что возрастания происходят во всех пунктах, хотя некоторые особенности, связанные с местом наблюдений, имеются. На рис. 1 представлены примеры таких возрастаний на ст. Апатиты, Баренцбург (арх. Шпицберген) и Нейтрино (Северный Кавказ). С целью выяснения происхождения возрастаний были проведены дополнительные эксперименты [Germanenko et al., 2011]. Выполненный в радиологической лаборатории анализ собранных при возрастании осадков показал лишь следовые количества радионуклидов.

На станции космических лучей в Апатитах на крыше здания был установлен дифференциальный осадкомер, измеряющий интенсивность осадков [Шишаев, Белоглазов, 2011]. Принцип работы осадкомера основан на измерении рассеиваемого падающими гидрометеорами ИК-излучения. Осадкомер не калиброван, используется для качественной оценки осадков.

Тщательный анализ событий возрастания и сопутствующих обстоятельств показал, что дополнительного выделения радона, вызванного воздействием осадков на проницаемость почвы, не происходит. На рис. 2 приведен пример типичного возрастания ЭМК, которое произошло 5 апреля 2012 г. Среднесуточная температура во вторую половину марта и первую половину апреля не поднималась выше -10°C . По данным веб-сайта [<https://rp5.ru>], толщина снежного покрова составляла ~ 80 см, снег плотный, слежавшийся за долготу зиму. Под снежным покровом слой промерзшей почвы. Событие возрастания 05.04.2012 связано с короткими снежными шквалами, следовавшими один за другим. Различия в показаниях осадкомера объясняются разной формой осадков при этих снежных шквалах. Первый шквал принес осадки в виде крупы, которая умеренно рассеивает ИК-излучение, а второй и третий шквал принесли осадки в виде крупных хлопьев. Количество осадков, оцениваемое по толщине слоя выпавшего снега, было примерно одинаковым. Каждый шквал

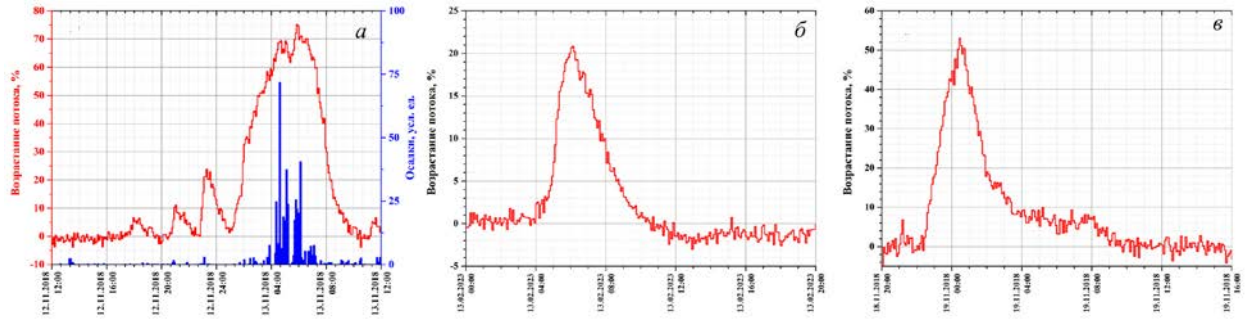


Рис. 1. Профили потоков электромагнитного излучения, зарегистрированные на ст. Апатиты (а), Нейтрино (б) и Баренцбург (в). Для ст. Апатиты (а) приведено также количество осадков в условных единицах. Использовано пяти-минутное усреднение, исходные данные имеют минутное разрешение. Статистическая ошибка измерений составляет менее 1 % для уровня счета перед возрастанием

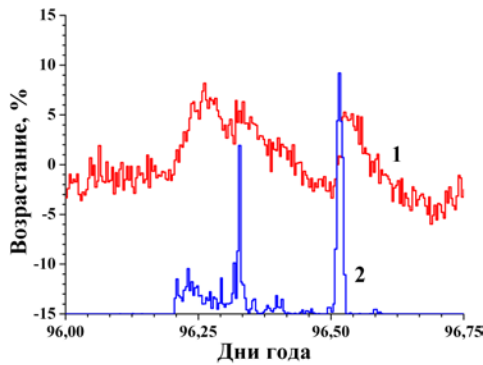


Рис. 2. Событие возрастания 05.04.2012, канал >100 кэВ (кривая 1). Количество осадков (кривая 2) приведено в относительных единицах и для удобства сдвинуто по шкале

длился не более получаса, после него оставался слой свежего снега ~ 2 см. Если предположить, что возрастания вызваны усилением выделения радона из почвы во время осадков, то возникает принципиальный вопрос: каким образом небольшой слой (~ 2 см) свежего рыхлого снега, выпавшего поверх толстого (~ 80 см) слоя слежавшегося за месяцы снега, влияет на скорость выделения радона из почвы? Нижние слои слежавшегося снежного покрова никак не изменяют своего физического состояния, равно как и мерзлая почва под ними. Именно такие зимние события наглядно показывают, что возрастания не связаны с дополнительным выделением радона из почвы.

Позже в термобокс был добавлен детектор заряженных частиц (ДЗЧ) на основе линейки счетчиков Гейгера. Эффективная площадь ДЗЧ составляет 180 см^2 , оценка потерь энергии регистрируемой частицы в кровле принята ~ 6 МэВ [Мурзин, 1988]. Сцинтилляционный детектор на кристалле NaI эффективен при регистрации как электромагнитного излучения, так и заряженных частиц (электронов, позитронов и мюонов) [Абрамов и др., 1985]. Счетчики Гейгера, напротив, имеют очень низкую чувствительность к электромагнитному (рентгеновскому и гамма) излучению [Абрамов и др., 1985]. Сравнение и анализ вариаций ВКЛ на этих двух детекторах позволяет определить, в каких компонентах ВКЛ происходит вариация. Результат следующий. Во-первых, доля заряженных частиц составляет менее 10 % от общего потока через кристалл NaI, т. е. счет сцинтилляционного детектора в основном

определяется не заряженными частицами, а потоком электромагнитного излучения. Во-вторых, во время осадков значимого возрастания на ДЗЧ не наблюдается: даже при 50 % возрастании ЭМК на ДЗЧ возможный рост темпа счета не превышает 3–4 %. Подробные результаты исследования событий возрастания приводятся в [Germanenko et al., 2011; Балабин и др., 2014].

По результатам наблюдений в период 2010–2022 гг. ЭМК ВКЛ было установлено следующее:

1. Возрастания ЭМК при осадках наблюдаются во всех пунктах наблюдений: Баренцбург (арх. Шпицберген); Апатиты; Тикси; Якутск; с. Монды, (Восточный Саян), высота 2800 м; Ростов-на-Дону; Нейтрино (Северный Кавказ), высота 1700 м.
2. Возрастания ЭМК наблюдаются круглый год, хотя в холодный период, когда осадки выпадают в твердом виде, амплитуда возрастаний падает в среднем в 1.5–2 раза.
3. Возрастания наблюдаются только в ЭМК ВКЛ. При возрастаниях не происходит заметного увеличения потока заряженных частиц, таких как электроны, позитроны, мюоны.
4. В осадках присутствуют долгоживущие естественные радионуклиды лишь в следовых количествах.
5. В 2020 г. сцинтилляционный детектор был размещен на борту научного судна, выполнявшего биологические исследования в Баренцевом и Гренландском морях [Балабин и др., 2022]. Две недели корабль находился в открытом море на расстоянии сотен километров от ближайшей суши. Были зарегистрированы события возрастания ЭМК во время осадков амплитудой 15–25 %.

В результате многолетних наблюдений сложилось понимание того, что возрастания ЭМК, вероятнее всего, не связаны с наличием каких-либо радионуклидов в осадках, а вызваны неким другим фактором, проявляющимся в атмосфере при осадках. Для подтверждения этого требуются прямые спектральные измерения ЭМК.

2. ИЗМЕРЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СПЕКТРА ЭМК

Измерениями спектров рентгеновского и гамма-излучения, поступающего из окружающей сре-

ды, занимаются многие исследовательские группы. В первую очередь это делается в целях контроля загрязнения воздуха, воды и почвы радионуклидами [Зорина и др., 2008; Петрова и др., 2009]. По известным линиям излучения определяется тип радионуклида и его концентрация. В этих работах внимание сосредоточивается на линиях радионуклидов, а ЭМК, присутствующая в атмосфере, служит фоном, уровень которого в каждом конкретном случае принимается как исходный [Torgii et al., 2002, 2009].

Другие группы занимаются исследованием влияния грозовой активности на ВКЛ, в первую очередь на потоки заряженных частиц [Gurevich et al., 1992; Гуревич, Зыбин, 2001; Dwyer et al., 2003, 2004; de Mendonca et al., 2011]. Эти работы упоминались выше. Такие наблюдения проводятся на станциях в низких и средних широтах, где грозовая активность существенна. Итогом теоретических расчетов [Gurevich, Milikh, 1999] и многочисленных наблюдений (например, [Alexeenko et al., 2002; Алексеевко и др., 2002; Лидванский и др., 2004]) является вывод, что в сильных электрических полях грозовых облаков при напряженности электрического поля в сотни кВ/м возможно ускорение заряженных частиц, несмотря на высокую плотность атмосферы. При движении в такой плотной среде, как земная атмосфера, легкие заряженные частицы будут производить дополнительное тормозное излучение [Гайтлер, 1956; Gurevich, Milikh, 1999]. Однако разделения ВКЛ на электромагнитную и заряженную компоненты при измерениях обычно не производится, подразумевается влияние грозовой активности на потоки заряженных частиц ВКЛ. В Заполярье грозы случаются крайне редко, соответственно, результаты этих работ не могут быть применены к нашим наблюдениям.

В середине 2022 г. в Апатитах был установлен и запущен в непрерывную работу спектрометр ЭМК. Спектрометр собран на сцинтилляционном кристалле NaI(Tl) диаметром 65 мм и высотой 65 мм и размещен в термобоксе рядом с другими детекторами ЭМК в таком же стакане, сложенном из свинцовых кирпичей. Поле зрения спектрометра ограничено стенками стакана и соответствует конусу с углом около 90° , обращенному основанием в зенит. Энергетический диапазон установлен 0.1–4 МэВ, время сбора одного дифференциального спектра задано 30 мин. Конечно, большее время сбора повышает точность измерения спектра и уменьшает флуктуации. Однако, поскольку длительность возрастных нередких составляет 2–3 ч, хотелось бы получать несколько спектральных измерений за это время, чтобы иметь возможность выбрать спектры, соответствующие отдельно фазе максимума или фазе роста. Исходя из этих двух условий было выбрано компромиссное значение 30 мин. С кристаллом используется скоростной 4096-канальный амплитудный анализатор импульсов, что обеспечивает измерение дифференциального спектра с шагом ~ 1 кэВ на канал при выбранном энергетически диапазоне и настройках усиления. Спектрометр прокалиброван по линиям

нескольких радионуклидов: К-40, Na-22, Cs-137, Co-60. По линии Cs-137 (660 кэВ) разрешение составило 5.1 %, что несколько лучше, чем указано в технической документации — 5.7 %.

С использованием программного Пакета RUSCOSMICS [Германенко и др., 2019] для данного кристалла была определена эффективность $Q(E)$ регистрации фотонов в зависимости от их энергии во всем рабочем диапазоне. При расчетах с помощью пакета RUSCOSMICS можно задавать не только тип кристалла и его размеры, но и физические параметры устройства спектрометра: материал и размеры защитной оболочки. На основе табличных данных [Григорьев, Мелихов, 1991] были определены коэффициенты поглощения $\mu(E)$ фотонов в материале крыши в рабочем диапазоне энергий. На основе полученных зависимостей $Q(E)$ и $\mu(E)$ производится внесение поправок в спектральные измерения, чтобы в итоге спектр соответствовал первичному излучению в атмосфере перед крышей. Далее везде в работе используется именно спектр, приведенный к первичному излучению.

За полгода (июнь–декабрь 2022 г.) зарегистрировано 68 возрастаний амплитудой >10 %. Такой порог для событий возрастания установлен в качестве разумной нижней границы: вычисляемая разность спектров при меньшей амплитуде становится сравнимой с уровнем флуктуаций, распознать какие-либо линии сложно. Кроме того, наблюдаются различные вариации потока электромагнитного излучения с амплитудой до 5 %. Эти малые вариации обычно растянуты на сутки и более, с какими-то определенными погодными явлениями связать их не удастся, чем они вызваны, неясно.

На рис. 3 приведены спектры ЭМК в событии возрастания 14.07.22. Профиль возрастания построен по данным канала >100 кэВ интегрального детектора на основе кристалла NaI(Tl). Далее в работе везде, где говорится о профилях и амплитудах возрастания, имеются в виду данные интегрального детектора, установленного рядом со спектрометром. Для вычисления среднего спектра перед возрастанием использованы десять спектров, зарегистрированных с 5 до 10 UT (интервал отмечен на профиле отрезком 1). Этот средний спектр назван базовым. В максимуме возрастания с 11 до 12 UT, отмеченном на рис. 3, а отрезком 2, зарегистрированы два спектра. Полученный средний спектр назван для краткости спектром возрастания. На рис. 3, б представлены средние спектры за указанные интервалы 1 и 2, а также их разность. Вычтя из спектра возрастания базовый спектр, получаем спектр собственно дополнительного излучения, которое вызвало эффект возрастания. Назовем его «спектр дополнительного потока» (СДП). Каждое событие, следовательно, характеризуется следующими тремя группами спектров: 1) набор базовых спектров; 2) набор спектров возрастания (иногда их всего 2–3), из этих двух наборов находятся средний базовый спектр и средний спектр возрастания; 3) СДП, получаемый как разность первых двух. Получить средний базовый спектр с хорошей точностью нетрудно, поскольку перед воз-

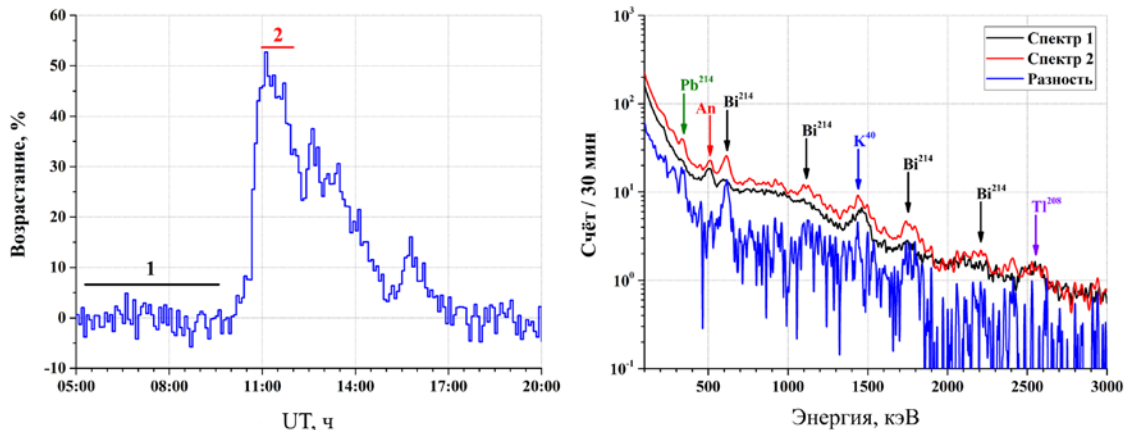


Рис. 3. Слева — профиль возрастания ЭМК 14.07.22 по данным интегрального детектора в канале >100 кэВ, отрезками 1 и 2 отмечены интервалы сбора дифференциальных спектров ЭМК. Справа: спектр 1 — средний спектр ЭМК перед возрастанием (базовый), спектр 2 — средний спектр в максимуме возрастания, разность — полученный из них СДП

растением обычно имеется достаточный временной интервал со стабильным потоком электромагнитного излучения. Спектр возрастания, соответствующий максимуму события, получается с меньшей точностью, так как период максимума события составляет обычно 1–2 ч, редко больше. Из представленного на рис. 3, а профиля возрастания ясно, что для сравнения спектров следует выбирать интервал в области максимума, где, во-первых, полученный спектр возрастания соответствует относительно стабильному потоку излучения, во-вторых, будет наибольшей разность спектров и выше точность. На фазе роста и спада за время сбора одного спектра поток излучения меняется значительно, и такой спектр оказывается слишком грубым приближением. Далее в работе спектр возрастания для каждого события означает спектр в максимуме события.

Базовый спектр имеет небольшое число отдельных линий на фоне непрерывной составляющей. Заметна линия 511 кэВ (An на рис. 3 и 4), соответствующая аннигиляции позитронов в атмосфере. Позитроны образуются в атмосфере как одна из компонент ВКЛ [Мурзин, 1988]. Сечение аннигиляции позитронов обратно пропорционально их скорости [Гайтлер, 1956], поэтому подавляющая часть энергичных позитронов аннигилирует только после того, как потеряет свою энергию. По этой причине аннигиляционный пик соответствует энергии покоя позитрона. Отчетливая линия 1460 кэВ соответствует распаду K-40. При β -распаде ядра K-40 [Григорьев, Мелихов, 1991; Искра, Бахуров, 1981] гамма-излучения не испускается. Однако с вероятностью 10 % распад K-40 происходит через электронный захват, приводящий к образованию возбужденного ядра Ag-40, время жизни которого составляет пикосекунды, затем ядро Ag-40 переходит на основной уровень с испусканием кванта 1460 кэВ [Григорьев, Мелихов, 1991]. Эта линия и является индикатором распада K-40. В базовом спектре можно заметить также слабые линии Bi-214 (609 и 1764 кэВ [Григорьев, Мелихов, 1991]) и Tl-208 (2614 кэВ [Lee, 2017]). Иных заметных линий в базовом спектре нет.

K-40 является естественным радионуклидом с большим периодом полураспада. Присутствие линии K-40 в базовом спектре закономерно, поскольку калий присутствует в живых организмах, в древесине, а также входит в состав многих распространенных минералов: силикатов, полевых шпатов и др. Радионуклид Bi-214 является дочерним нуклидом ряда U-238, а Tl-208 является дочерним нуклидом ряда Th-232 [Козлов, 1991]. U-238 и Th-232 — радионуклиды, присутствующие в большинстве пород, поэтому наличие этих линий в спектре естественно.

В спектре возрастания наблюдается усиление уже имевшихся в базовом спектре линий, а также появляются линии Pb-214 (352 кэВ) и Bi-214 (1120 кэВ, 1764 кэВ). Слабая линия ~ 2200 кэВ, предположительно, также принадлежит Bi-214 [Lee, 2017]. Впрочем, эта слабая линия в наших дальнейших вычислениях не участвует. В целом, как видно на рис. 3, оба спектра являются сплошными падающими с отдельными линиями.

Наиболее интересным является СДП, получаемый вычитанием из спектра возрастания базового спектра. Заметим, что все получаемые дифференциальные спектры суть массивы, содержащие количество фотонов, попавших в интервал энергии $[E, E + dE]$, где $dE = 1$ кэВ, а E принимает целые значения от 100 до 4000 кэВ. Поэлементное вычитание базового спектра из спектра возрастания дает нам СДП. Несмотря на значительную амплитуду возрастания, точность полученного одиночного СДП невелика. На рис. 4 представлен результат суммирования спектров девяти событий с амплитудой более 20 %. Базовый спектр получен путем усреднения девяти базовых спектров выбранных событий. Таким же путем получен и спектр возрастания этих девяти событий. СДП на рис. 4, полученный как разность этих двух спектров, обладает существенно лучшей точностью, и на нем хорошо различимы некоторые важные особенности.

Качественный анализ спектров на рис. 4 показывает, что все три спектра близки по форме, а линии радионуклидов выражены слабо и не определяют форму спектров. Форма спектров определяется конти-

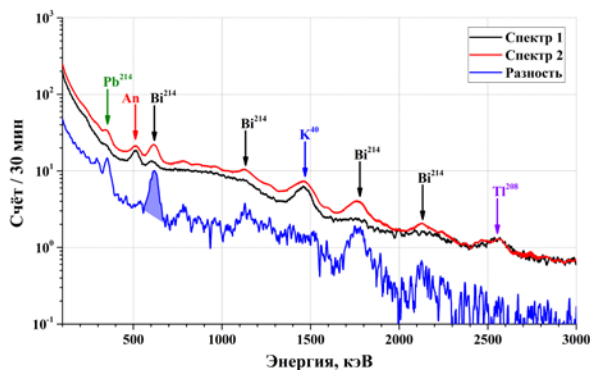


Рис. 4. Средние спектры ЭМК по девяти событиям возрастания с амплитудой более 20 %. Используются события за теплый период второй половины 2022 г.

нуальной частью, описываемой убывающей функцией. Спектр возрастания практически является базовым спектром, умноженным на некоторую величину, соответственно, СДП, вычисляемый как их разность, также подобен базовому спектру. Что означает: излучение явно имеет источником своего происхождения не радионуклиды.

Первое, что обращает на себя внимание: на СДП полностью отсутствует линия аннигиляции! Следовательно, поток позитронов на уровне земли во время возрастания не изменяется, скорость их аннигиляции сохранилась прежней. Во-вторых, линии К-40 и Тl-208 на СДП также отсутствуют. Это означает, что источники этих линий находятся в окружающих предметах и не связаны с осадками, соответствующие им вклады в спектры одинаковые, при вычитании они обнулились. На СДП выделяются линии Рb-214 и Bi-214, причем слабые линии на рис. 3 хорошо проявляются на рис. 4. Очень слабая линия около 760 кэВ может принадлежать Bi-214 [Lee, 2017].

По СДП определяется верхний энергетический предел эффекта возрастания. На рис. 4 видно, что около 2500 кэВ СДП отражает лишь случайные флуктуации исходных спектров, от которых он получен. Итак, ранее полученная оценка верхнего порога оказалась верной. Спектр дополнительного потока, вызывающего возрастание, имеет верхнюю границу 2500 кэВ.

Рисунок 4 позволяет более наглядно представить операции, которые выполняются над СДП во всех событиях. Во-первых, вычисляется интеграл спектральной функции в рабочем диапазоне энергий:

$$N = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} S_{\text{ад}}(E) dE, \quad (1)$$

где E_{\max} и E_{\min} — значения верхнего и нижнего энергетических пределов для спектрометра (напомним, это 100 и 4000 кэВ); $S_{\text{ад}}(E)$ — спектр дополнительного излучения. Величина N соответствует количеству дополнительных фотонов, вызвавших возрастание.

Во-вторых, вычисляется интеграл спектральной функции с весами на том же интервале:

$$F = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} S_{\text{ад}}(E) E dE. \quad (2)$$

Величина F соответствует энергии, принесенной N фотонами дополнительного потока. Поскольку все спектры являются одномерными массивами, то выражение (1) соответствует суммированию элементов массива, а (2) — суммированию с весом.

Заметим, что СДП в целом представляет собой также непрерывный спектр, в котором имеются отдельные линии элементов, а в широких полосах (например, 400–550 кэВ, 800–1050 кэВ) наблюдаются только небольшие флуктуации. Поскольку линии хорошо разделены, можно вычислить парциальные вклады фотонов каждой присутствующей в спектре линии радионуклидов: Рb-214 (352 кэВ), Bi-214 (609, 1120 и 1764 кэВ) и т.д. В качестве примера на рис. 4 заливкой «колокола» линии 609 кэВ показан парциальный вклад фотонов этой линии. Основанием «колокола» служит интерполяция между участками спектра до и после выбранной линии. Для вычисления парциального вклада используется выражение (1) в пределах ширины линии:

$$N_i = \int_{E_{i,1}}^{E_{i,2}} (S_{\text{ад}}(E) - Z_i(E)) dE, \quad (3)$$

где $E_{i,1}$ и $E_{i,2}$ — левая и правая границы линии i по энергии; $Z_i(E)$ — интерполирующая на ограниченном участке спектра функция без учета данной линии радионуклида; N_i — число фотонов, излученных радионуклидом в линии i .

Полезным будет также определение средней по спектру энергии фотонов или какой-либо его части, вычисляемой по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} S(E) E dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} S(E) dE}, \quad (4)$$

где $S(E)$ — один из трех имеющихся спектров. Если в формулу подставляется базовый спектр, получается средняя энергия фотонов фона, если СДП, получается средняя энергия фотонов дополнительного потока. Средняя энергия фотонов, вычисленная по какому-либо спектру, является интегральной характеристикой, отражающей вклад разных энергий в спектре. Более жесткий спектр в целом или добавление фотонов больших энергий обеспечит большее значение средней энергии.

Для выполнения описанных операций со спектрами всех зарегистрированных возрастаний были созданы специальные программы. Спектры обрабатывались по единому алгоритму, участие оператора сводилось к выбору интервалов 1 и 2 (см. рис. 3) и заданию значений энергий $E_{i,1}$ и $E_{i,2}$. Использовано 68 событий возрастаний >10 %. Результаты представлены ниже на рис. 5.

Рисунок 5, а показывает зависимость полной энергии, принесенной фотонами дополнительного излучения, от амплитуды возрастания. Прослеживается четкая линейная зависимость, особенно если проводить ее по нижним значениям.

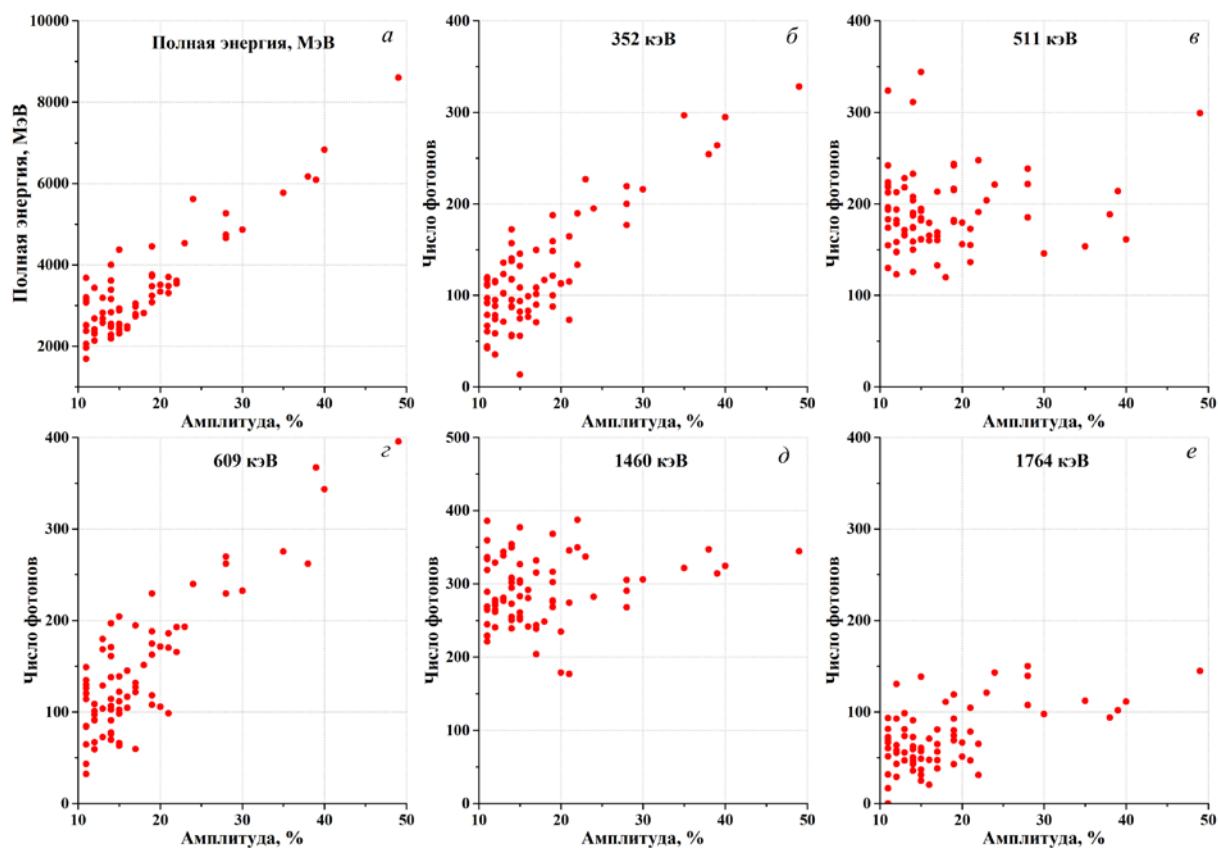


Рис. 5. Результаты обработки массива спектров, полученных в событиях возрастаний в 2022 г.: *a* — полная энергия, привнесенная дополнительным излучением, вычислена по (2); *b–z* — количество фотонов, излученных в линиях 352 кэВ (Pb-214), 511 кэВ (аннигиляционный пик), 609 кэВ (Bi-214), 1460 кэВ (K-40) и 1764 кэВ (Bi-214). Одна точка графика соответствует одному событию возрастания и одному спектру СДП, из которого эти величины получены

Количество фотонов в линиях 352, 609, и 1764 кэВ также показывает линейную зависимость от амплитуды возрастания. Отсутствие зависимости аннигиляционной линии от амплитуды означает, что на этот компонент ВКЛ осадки не оказывают влияния. То же самое касается и линии K-40. Этот вывод уже был сделан ранее при анализе СДП, здесь он подтвержден независимым путем. Следовательно, в дальнейшем при вычислениях вкладов эти две линии не будут учитываться. Стоит отметить, что более 2/3 событий имеют амплитуду возрастания <20 %. С уменьшением амплитуды разброс значений заметно возрастает. Большой разброс при меньших амплитудах, вероятнее всего, вызван вкладом небольших (до 5 %) вариаций, о которых говорилось ранее и которые не связаны с осадками. Накладываясь на возрастания при осадках, эти вариации вносят дополнительную ошибку и приводят к разбросу вычисленных величин при меньших амплитудах. С увеличением амплитуды возрастания, обусловленной осадками, роль других вариаций снижается, и события с амплитудой >20 % гораздо четче формируют линейные зависимости. Представляется удобным перейти к нормированным величинам, полученным при обработке спектров. Следует выполнить нормировку на амплитуду возрастания, что нагляднее обозначит действующий фактор.

Поскольку число поступивших в спектрометр фотонов, излученных радионуклидами в различных

линиях, известно, легко вычислить суммарную энергию, привнесенную этими фотонами. Всего в СДП в десятках событий выявлены линии с энергиями 352, 609, 764, 1120 и 1764 кэВ. Определив по выражению (3) для каждой линии количество фотонов, мы рассчитали суммарную энергию, привнесенную этими линиями в СДП. Результаты приведены на рис. 6.

Обсуждение результатов наблюдений

Рисунок 6, *a* — это рис. 5, *a*, представленный в нормированном виде. На рис. 6, *a* явно наблюдается постоянство удельного выделения энергии: при возрастании в кристалл дополнительно поступает ~170–180 МэВ на 1 % амплитуды. Особенно хорошо это видно для амплитуд >20 %. Рисунок 6, *b* характеризует удельную суммарную энергию, поступившую от всех линий радионуклидов, присутствующих в СДП. Точно так же наблюдается постоянство приносимой радионуклидами энергии: ~17–8 МэВ на 1 % амплитуды.

Рисунки 5 и 6, *a*, *b* показывают, что амплитуда возрастания и количество радионуклидов связаны линейно. Напрашивается вывод, что именно радионуклиды являются основной причиной возрастания. Этому противоречат данные, представленные на рис. 6, *в*, *z*, и соотношение полной и суммарной энергий. Для обеспечения наблюдаемой амплитуды возрастания поток энергии должен быть на порядок

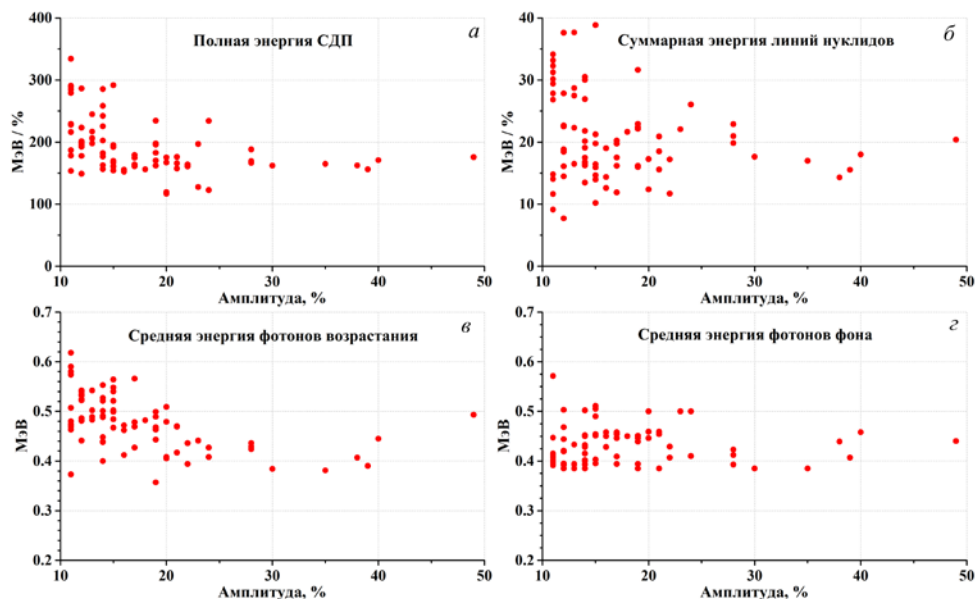


Рис. 6. Полная энергия (а), поступившая с дополнительным излучением, и суммарная энергия (б), внесенная линиями радионуклидов, нормированные на 1 % амплитуды возрастания; средняя энергия фотонов при возрастании (в); средняя энергия фотонов фона (г). Одна точка графика соответствует одному событию и одному СДП, из которого эти величины получены

больше, чем обеспечивают все линии радионуклидов, присутствующие в СДП.

На рис. 6, г представлены значения средней энергии фотонов фона ϵ_b , вычисленные по среднему базовому спектру по (4). Значения ϵ_b держатся около 0.45 МэВ для всего множества событий. Это подтверждается измерениями на интегральном детекторе: весь период измерений спектров базовый (фоновый) поток электромагнитного излучения менялся мало, после любого возрастаний поток электромагнитного излучения приходил к прежнему уровню. На рис. 6, в показаны значения средней энергии фотонов при возрастании ϵ_l , вычисленные по СДП. Разброс значений ϵ_l больше, чем разброс значений ϵ_b , однако ϵ_l имеет также значение около 0.45 МэВ. Близость значений ϵ_l и ϵ_b означает, что базовый спектр и СДП мало различаются по форме. Величина 0.45 МэВ меньше, чем энергии перечисленных выше линий радионуклидов в СДП, за исключением линии 352 кэВ, следовательно, значимый вклад этих линий привел бы к увеличению ϵ_l . Близость значений средних энергий при всех амплитудах возрастания, даже самых больших, подтверждает, что вклад линий радионуклидов в спектр и, соответственно, в возрастание мал.

Еще одно свидетельство несущественности влияния линий радионуклидов при возрастании представлено на рис. 7. Двадцать первого февраля 2023 г. было зарегистрировано событие возрастания амплитудой 20 %. Особенностью данного события являлась большая длительность. Более полусуток амплитуда возрастания держалась на уровне 18–20 %, этот период соответствовал длительной непогоде с метелью и снегопадом. Это позволило получить с приемлемой точностью СДП для одиночного события. Для сравнения были взяты шесть обычных

событий, наблюдавшихся в декабре 2022 г. Ранее было отмечено, что события в разные сезоны имеют в среднем разные амплитуды возрастания, соответственно, для сравнения следует брать события близкой амплитуды за один сезон. Ноябрь 2022 г. еще нельзя было назвать по-настоящему зимним месяцем, он был теплым, случались дожди, устойчивый снежный покров образовался во второй половине месяца. Поэтому для сравнения взяты события за декабрь, когда температура постоянно была отрицательной и установился постоянный снежный покров. Эти события имели амплитуду 18–21 %, длительность в максимуме каждого составляла 1–2 ч. Мы получили средний СДП по этим шести событиям. На рис. 7 показаны два СДП — для шести декабрьских событий и для одиночного события в феврале. На левой панели для наглядности представлены участки спектров в линейной шкале.

Два этих события возрастания (усредненное декабрьское и одиночное в феврале) имеют близкую амплитуду, близкие по абсолютным значениям СДП. События произошли в холодный сезон, сопровождались осадками одного типа — снегом. В зимних событиях, как показали спектральные измерения, линии радионуклидов слабее выражены, однако, как видно по декабрьскому СДП, линия 609 кэВ довольно отчетливая, другие линии едва выделяются на фоне флуктуаций. Декабрьский СДП подобен спектрам для остальных зимних событий. На февральском СДП практически отсутствуют какие-либо линии, самая сильная линия 609 кэВ едва угадывается, тем не менее этот СДП соответствует событию с такой же амплитудой возрастания 20 %.

Заметим, что еще задолго до проведения спектральных измерений авторы были убеждены в малости вклада радионуклидов в наблюдаемый эффект возрастания

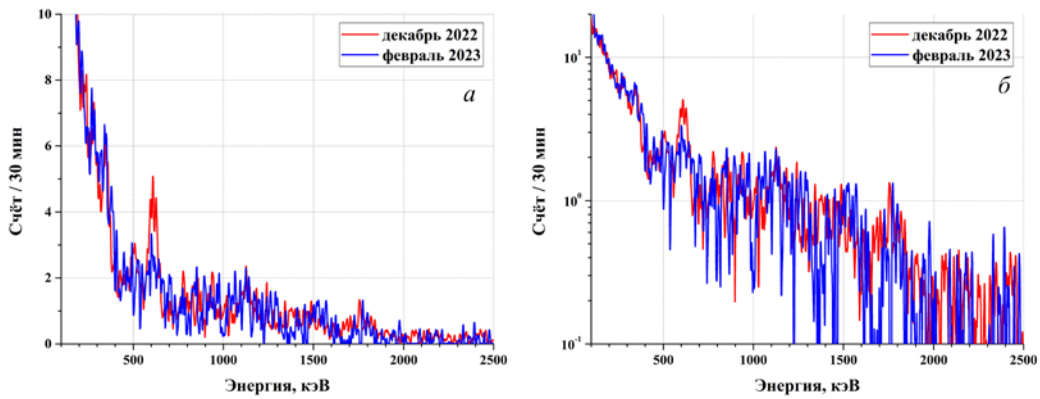


Рис. 7. СПД для событий зимнего периода: *a* — участки спектров в линейной шкале, чтобы показать значимую линию 609 кэВ; *б* — весь спектр в полулогарифмическом масштабе. СПД, показанный красной линией, является усредненным по шести событиям возрастания 21–25 декабря 2022 г.

тания ЭМК при осадках после проведенного наглядного эксперимента. Эксперимент состоял в следующем. Во время сильного летнего ливня, когда рабочий детектор показал возрастание, подобное приведенному на рис. 3, *a*, дождевая вода объемом 5 л с крыши здания была собрана в пластиковую бутыл. Согласно оценкам, выполненным на основе [Матвеев, 1984], масса воды в бутылке соответствовала массе капель, находившихся в поле зрения рабочего детектора до высоты 80–100 м. Не более чем через 5 мин после сбора бутылка с водой была помещена на дополнительный детектор внутри защиты, сложенной из свинцовых кирпичей и закрывающей детектор со всех сторон. Детектор был идентичен используемому в наблюдениях. Дополнительный детектор с дождевой водой на нем не отметил никакого возрастания, притом что рабочий детектор, в поле зрения которого находилось примерно такое же количество воды в виде капель дождя, показывал возрастание 40–50 %!

Этот эксперимент дал хоть и весомое, но не прямое указание, что радионуклиды в значимых количествах отсутствуют в осадках. Более точные и убедительные результаты позволили получить спектральные измерения.

В работе [Lee, 2017] при проведении спектральных наблюдений использовался спектрометр, аналогичный использованному нами, с близкими характеристиками. Он был установлен в кампусе корейского университета, около года с его помощью проводился мониторинг рентгеновского и гамма-излучения. Основной целью мониторинга являлось измерение состава и концентрации радионуклидов в окружающей среде. О том, что при осадках возрастает поток гамма-излучения, говорит сам автор. На приведенном в работе [Lee, 2017] рис. 5 четко прослеживаются события возрастания, связанные с осадками, но автор сосредоточился на линиях радионуклидов и вычислении дозы, которую эти радионуклиды дают, оставив без внимания изменение фонового уровня.

На рис. 8 мы приводим скан рисунка 10 из работы [Lee, 2017]. Четко виден аналогичный эффект: спектр во время осадков (оранжевый) подобен фоновому спектру (голубой), смещенному к большим значениям.

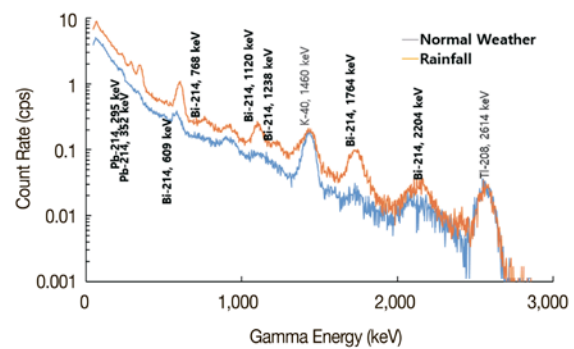


Рис. 8. Измерения спектра ЭМК во время осадков. Наблюдения проводились недалеко от Сеула (Корея). Рисунок заимствован из работы [Lee, 2017], там же можно найти подробную информацию об используемом спектрометре и сводную таблицу с десятками подобных событий

Lee [2017] этот факт никак не комментирует и не отмечает, для него это не имеет значения. На рис. 8 также хорошо видно, что оба спектра около 2500 кэВ начинают совпадать, что указывает на верхний энергетический порог СПД около значения 2.5 МэВ. Такая же оценка верхнего энергетического предела СПД была сделана нами в работе [Балабин и др., 2014]. Здесь верхний предел получен прямыми измерениями дифференциального спектра.

Спектры на рис. 8 были оцифрованы, и были получены базовый спектр и спектр возрастания в виде массивов, из которых можно вычислить СПД для этого зарегистрированного в Корее события. Были вычислены также интегральные характеристики возрастания. Спектры на рис. 8 соответствуют возрастанию ЭМК ~80 %, вклад всех имеющихся в спектре линий радионуклидов составил 0.12 от полной энергии, привнесенной при возрастании. Средняя энергия спектра $\varepsilon_l = 0.47$ МэВ. Как видим, характеристики события, приведенного в [Lee, 2017] как типичный пример, близки к тем, что получены нами для возрастаний ЭМК в Апатитах.

В других работах также встречаются свидетельства возрастаний ЭМК во время осадков. Например, в работе [Togii et al., 2009] на рис. 1 при грозе наблюдается возрастание темпа счета детектора, но авторами рассматривается только эффект коротких возрастаний, вызванных молниями. Это показы-

вает, что эффект возрастания темпа счета детектора при осадках присутствует в измерениях других групп, исследующих вариации гамма-излучения в атмосфере, однако, поскольку у них другие цели исследования, изменения фонового излучения остаются без внимания.

Основные результаты спектрометрических измерений

1. Базовый спектр, измеренный перед возрастанием, спектр возрастания, измеренный в максимуме события, и их разность СДП подобны. Они представляют собой непрерывную убывающую функцию с отдельными линиями радионуклидов, немногочисленными и умеренными по интенсивности.

2. Суммарная энергия, обеспеченная всеми присутствующими линиями радионуклидов, на порядок меньше полной энергии, поступившей в детектор за то же время при возрастании.

3. Среди зимних возрастаний с амплитудой ~20 % встречаются события, СДП которых практически не имеет выраженных линий радионуклидов.

4. Средние энергии, вычисленные по базовому спектру и СДП, различаются незначительно. Средние энергии составляют ~0.45 МэВ. Линии радионуклидов, за исключением одной, имеют энергию значительно больше средней энергии. Будь вклад линий значимым, это приводило бы к сдвигу средней энергии в сторону больших значений.

В результате длительных измерений дифференциальных спектров ЭМК в периоды хорошей погоды и во время осадков можно считать установленным, что наблюдаемые возрастания потока электромагнитного излучения не обусловлены наличием радионуклидов в осадках. По-видимому, эти возрастания происходят в результате изменения условий распространения и взаимодействия ВКЛ в атмосфере, вызванного метеорологическими процессами. Для выяснения причины возрастаний потоков электромагнитного излучения во время осадков требуется дальнейшая регистрация спектров ЭМК в разных географических точках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг электромагнитной компоненты (ЭМК) вторичных космических лучей, возникающей в атмосфере, проводится в Полярном геофизическом институте более десяти лет на целом ряде станций: п. Баренцбург (арх. Шпицберген), Апатиты (Кольский п-ов), Ростов-на-Дону, п. Нейтрино (Северный Кавказ), с. Монды (Восточный Саян). Во всех пунктах наблюдений отмечены многочисленные (десятки в год) события возрастания потока электромагнитного излучения на 10–50 % и больше. В подавляющем большинстве случаев эти события сопровождаются осадками. Дополнительные эксперименты косвенно указывают на то, что радионуклиды не могут быть причиной возрастания. В 2022 г. в Апатитах были начаты непрерывные измерения дифференциального спектра электромагнитного излучения в диапазоне 0.1–4 МэВ с использованием спектрометрического кристалла NaI(Tl) и временем сбора

одного спектра 30 мин. Были получены спектры ЭМК в максимуме 68 событий возрастания. Спектры перед возрастанием и в период максимальной амплитуды возрастания имеют близкую форму: падающий непрерывный спектр с отдельными линиями радионуклидов небольшой интенсивности. Разработан метод получения отдельного спектра дополнительного излучения, которое вызывает возрастание. Эти спектры были тщательно проанализированы. Во всех спектрах присутствуют линии некоторых радионуклидов. Наиболее заметны линии К-40, Рb-214, Bi-214. Однако суммарная доля (по числу квантов) всех линий радионуклидов составляет ~0.1 потока, который вызвал возрастание. В одном из зимних событий с амплитудой возрастания ~20 % спектр имел едва различимые на фоне флуктуаций линии радионуклидов, практически линии радионуклидов отсутствовали. Следовательно, можно считать установленным, что эффект возрастания ЭМК при осадках не обуславливается радионуклидами в осадках. Возрастания ЭМК имеют иную природу и, по-видимому, вызваны влиянием метеорологических процессов в атмосфере на распространение вторичных космических лучей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-77-10018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. *Основы экспериментальных методов ядерной физики*. М.: Энергоиздат, 1985. 267 с.
- Алексеев В.В., Лидванский А.С., Петков В.Б., Хаердинов Н.С. О разных типах возрастаний космических лучей перед разрядами молний. *Изв. РАН. Сер. физ.* 2002. Т. 66, № 11. С. 1581–1584.
- Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Ващенко Э.В. Вариации естественного рентгеновского фона в полярной атмосфере. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2014. Т. 54, № 3. С. 376–386. DOI: [10.7868/S0016794014020023](https://doi.org/10.7868/S0016794014020023).
- Балабин Ю.В., Германенко А.В., Михалко Е.А. и др. Наблюдение вариаций потоков вторичных космических лучей во время морской экспедиции в Северном Ледовитом океане. *Изв. РАН, сер. физ.* 2022. Т. 86, № 3. С. 360–364. DOI: [10.31857/S0367676522030036](https://doi.org/10.31857/S0367676522030036).
- Гайтлер В. *Квантовая теория излучения*. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 492 с.
- Германенко А.В., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. Расчет функций эффективности регистрации сцинтилляционных детекторов NaI (Тl) и сравнение работы модели с данными реального эксперимента. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2019. Т. 10, № 8-5. С. 82–87. DOI: [10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8.82-87](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8.82-87).
- Григорьев И.С., Мелихов Е.З. *Физические величины: Справочник*. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.
- Гуревич А.В., Зыбин К.П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы. *Успехи физических наук*. 2001. Т. 171, № 11. С. 1177–1199. DOI: [10.3367/UFNr.0171.200111b.1177](https://doi.org/10.3367/UFNr.0171.200111b.1177).
- Дорман Л.И. *Метеорологические эффекты космических лучей*. М.: Наука, 1972. 212 с.
- Дорман Л.И. *Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей*. М.: Наука, 1975. 402 с.
- Зорина Л.В., Бураева Е.А., Давыдов М.Г., Стасов В.В. Радионуклид ²¹⁰Pb в атмосферных аэрозолях в приземном слое воздуха и метеопараметры г. Ростова-на-Дону. *Изв.*

стия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2008. № 5. С. 108–113.

Иваненко И.П. *Электромагнитные каскадные процессы*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. 176 с.

Искра А.А., Бахуров В.Г. *Естественные радионуклиды в биосфере*. М.: Энергоатомиздат, 1981. 123 с.

Козлов В.Ф. *Справочник по радиационной безопасности: 4-е изд.* М.: Энергоатомиздат, 1991. 352 с.

Лазутин Л.Л. *Рентгеновское излучение авроральных электронов и динамика магнитосферы*. Л.: Наука, 1979. 200 с.

Лидванский А.С., Петков В.Б., Хаердинов Н.С. Вариации интенсивности мюонов космических лучей вызванные грозowymi электрическими полями. *Изв. РАН. Серия физическая*. 2004. Т. 68, № 11. С. 1605–1607.

Матвеев Л.Т. *Курс общей метеорологии*. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 752 с.

Мироньчев П.В. Космические мюоны в грозowych электрических полях. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2003. Т. 43, № 5. С. 702–707.

Мурзин В.С. *Введение в физику космических лучей*. М.: Изд-во МГУ, 1988. 320 с.

Петрова Т.Б., Микляев П.С., Власов В.К. и др. Вариации содержания ^7Be в приземном слое атмосферы на средних широтах. *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*. 2009. Т. 50, № 5. С. 396–401.

Хаякава С. *Физика космических лучей. Ч. 1: Ядерно-физический аспект; Ч. 2: Астрофизический аспект*. М.: Наука, 1974. 1042 с.

Шишаев В.А., Белоглазов М.И. Автоматический регистратор атмосферных осадков. *Приборы и техника эксперимента*. 2011. № 2. С. 156–158.

Alexeenko V.V., Khaerdinov N.S., Lidvansky A.S., Petkov V.B., Transient variations of secondary cosmic rays due to atmospheric electric field and evidence for pre-lightning particle acceleration. *Phys. Lett. A*. 2002. Vol. 301, iss. 3-4. P. 299–306. DOI: [10.1016/S0375-9601\(02\)00981-7](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(02)00981-7).

de Mendonca R.R.S., Raulin J.-P., Bertoni F.C.P., et al. Long-term and transient time variation of cosmic ray fluxes detected in Argentina by CARPET cosmic ray detector. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. Vol. 73, iss. 11-12. P. 1410–1416. DOI: [10.1016/j.jastp.2010.09.034](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.034).

Dwyer J.R., Uman M.A., Rassoul H.K., et al. Energetic radiation produced during rocket-triggered lightning. *Science*. 2003. Vol. 299, no. 5607. P. 694–697. DOI: [10.1126/science.1078940](https://doi.org/10.1126/science.1078940).

Dwyer J.R., Rassoul H.K., Al-Dayeh M., et al. A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning. *Geophys. Res. Lett.* 2004. Vol. 31, iss. 5. L05119. DOI: [10.1029/2003GL018771](https://doi.org/10.1029/2003GL018771).

Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V., et al. High-energy photons connected to atmospheric precipitations. *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011. Vol. 7, iss. 4. P. 471–475. DOI: [10.5194/astra-7-471-2011](https://doi.org/10.5194/astra-7-471-2011).

Gurevich A.V., Milikh G.M. Generation of X-rays due to multiple runaway breakdown inside thunderclouds. *Phys. Lett. A*. 1999. Vol. 262, iss. 6. P. 457–463. DOI: [10.1016/S0375-9601\(99\)00695-7](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(99)00695-7).

Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Phys. Lett. A*. 1992. Vol. 165, iss. 5-6. P. 463–468. DOI: [10.1016/0375-9601\(92\)90348-P](https://doi.org/10.1016/0375-9601(92)90348-P).

Lee M.S. Gamma-ray exposure rate monitoring by energy spectra of NaI (TI) scintillation detectors. *Journal of Radiation Protection and Research*. 2017. Vol. 42, iss. 3. P. 158–165. DOI: [10.14407/jrpr.2017.42.3.158](https://doi.org/10.14407/jrpr.2017.42.3.158).

Muraki Y., Axford W.I., Matsubara Y., et al. Effects of atmospheric electric fields on cosmic rays. *Phys. Rev.* 2004. Vol. 69. 123010. DOI: [10.1103/PhysRevD.69.123010](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.123010).

Torii T., Takeishi M., Hosono T. Observation of gamma-ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. D17. 4324. DOI: [10.1029/2001JD000938](https://doi.org/10.1029/2001JD000938).

Torii T., Sugita T., Tanabe S., et al. Gradual increase of energetic radiation associated with thunderstorm activity at the top of Mt. Fuji. *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36, iss. 13. L13804. DOI: [10.1029/2008GL037105](https://doi.org/10.1029/2008GL037105).

URL: <https://rp5.ru> (дата обращения 22 февраля 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Маурчев Е.А., Михалко Е.А. Связанные с осадками события возрастания электромагнитной компоненты вторичных космических лучей: спектральные измерения и анализ. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 2. С. 41–51. DOI: [10.12737/szf-92202305](https://doi.org/10.12737/szf-92202305).