

Научная статья
УДК 551.521.64
doi:10.37614/2949-1185.2023.2.2.011

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ДЛИТЕЛЬНЫХ СОБЫТИЯХ ВОЗРАСТАНИЯ

Ю. В. Балабин¹, А. В. Германенко¹, Е. А. Маурчев^{1, 2}, Е. А. Михалко¹, Б. Б. Гвоздевский¹

¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ю. В. Балабин, balabin@pgia.ru

Аннотация

Работа посвящена исследованию малоизученного явления: возрастанию во время осадков рентгеновского и гамма-излучения, приходящего из атмосферы. В данной работе внимание сосредоточено на анализе событий длительных возрастаний, которые происходят редко и отличаются от типичных событий возрастаний медленным ростом, наличием многих максимумов. Используется измеритель дифференциального спектра электромагнитного излучения в диапазоне 0,1–4 МэВ. Анализ спектров, измеренных в длительных событиях возрастания, показал, что характеристики спектров не отличаются от таких же характеристик в обычных возрастаниях. Делается вывод, что длительные события не отличаются от обычных и обусловлены теми же причинами.

Ключевые слова:

вторичные космические лучи, электромагнитная компонента, спектр излучения, возрастание, радионуклиды

Благодарности:

исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 18-77-10018.

Original article

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF X-RAY AND GAMMA RADIATION IN LONG-TERM GROWTH EVENTS

Y. V. Balabin¹, A. V. Germanenko¹, E. A. Maurchev^{1, 2}, E. A. Mikhalko¹, B. B. Gvozdevsky¹

¹Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

²IZMIRAN, Moscow, Russia

Corresponding author: Yu. V. Balabin, balabin@pgia.ru

Abstract

The work is devoted to the study of a little-studied phenomenon: an increase in X-ray and gamma radiation coming from the atmosphere during precipitation. In this work, attention is focused on the analysis of long-term increase events, which occur rarely and differ from typical increase events in slow growth and the presence of many maxima. A differential spectrum meter for electromagnetic radiation in the range of 0.1–4 MeV is used. An analysis of the spectra measured in long-term increase events showed that the characteristics of the spectra do not differ from the same characteristics in ordinary increases. It is concluded that long-term events do not differ from ordinary ones and are due to the same reasons.

Keywords:

secondary cosmic rays, electromagnetic component, emission spectrum, increase, radionuclides

Acknowledgments:

this study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 18-77-10018.

Введение

Космические лучи являются глобальным фактором, воздействующим на Землю различным образом не только в верхних слоях атмосферы, но и по всей ее глубине и даже под землей. Взаимодействия первичной частицы космических лучей с ядром атома воздуха происходит на высотах 20–25 км (Дорман, 1975; Хаякава, 1974). В результате этого взаимодействия в атмосфере возникают несколько компонент вторичных космических лучей (ВКЛ). Основными компонентами являются нуклонная (нейтроны, протоны, пионы; доля нейтронов подавляющая, около 90 %), электронно-мюонная и электромагнитная. В последнюю входят рентгеновские и гамма-кванты. Эти компоненты распространяются вглубь атмосферы, испытывая превращения из одной в другую и постепенно поглощаясь. Существенная связь имеется между электронно-мезонной и электромагнитной компонентами. Мезоны являются нестабильными частицами и распадаются. В результате распада возникают электроны, позитроны и гамма-кванты. Электроны и позитроны высоких энергий в атмосфере производят тормозное излучение, а гамма-кванты в результате взаимодействия с веществом производят электроны и позитроны (рождение пар) больших энергий. О каскадных процессах в атмосфере подробнее можно найти в работах (Беленький, 1948; Мурзин, 1988). В итоге на любой высоте в атмосфере присутствуют все три компоненты ВКЛ. При распространении вглубь атмосферы, как уже было сказано, происходит их постепенное ослабление.

Наземные детекторы (нейтронные мониторы, мюонные телескопы и другие), выполняющие мониторинг космических лучей, на самом деле регистрируют ВКЛ, сами первичные частицы космических лучей до поверхности земли не доходят. Менее всего подвержена влиянию атмосферных процессов нейтронная компонента, для которой имеет значение только масса вещества, пройденного частицами. Исправление этого влияния производится внесением барометрической поправки, поскольку атмосферное давление достаточно точно соответствует количеству вещества над прибором. Для исправления влияния атмосферных процессов на мюоны требуется, помимо барометрического эффекта, дополнительно учитывать и температуру атмосферы во всем столбе воздуха от уровня земли до высоты их образования (Дорман, 1972; Дорман 1975). Наиболее подверженной влиянию различных процессов в атмосфере является электромагнитная компонента ВКЛ. Поэтому в чистом виде наземных детекторов электромагнитной компоненты нет.

Эксперимент

Помимо мониторинга потоков космических лучей нейтронными мониторами и мюонными телескопами лабораторией космических лучей Полярного геофизического института (ПГИ), дополнительно проводится долговременный мониторинг электромагнитной компоненты ВКЛ. В Апатитах он ведется с 2010 г. В Баренцбурге (арх. Шпицберген) он выполняется более 10 лет. На этих станциях создана комплексная система мониторинга основных компонентов ВКЛ и включает нейтронный монитор (НМ), мюонный телескоп (МТ), отдельно детекторы заряженной и электромагнитной компонент. В дополнительных пунктах (Монды, В. Саяны, 2800 м; Нейтрино, Сев. Кавказ, 1700 м; Тикси; Ростов-на-Дону) установлены только детекторы электромагнитной компоненты (ЭМК). Всюду используются однотипные детекторы на основе кристалла NaI(Tl) размером $\varnothing 62 \times 20$ мм, разработанные в ПГИ. Их рабочий диапазон — 20–400 кэВ, они калиброваны по линиям 27 и 61 кэВ америция-241. Имеют интегральные каналы > 20 , > 60 и > 100 кэВ. Детекторы размещаются в стаканах, сложенных из свинцовых кирпичей толщиной 50 мм так, что поле зрения детектора представляет собой конус с углом при вершине $\sim 140^\circ$, направленный в зенит. Все это помещено в термобокс и установлено на чердаке здания, чтобы как можно меньше находилось вещества над детекторами. Почти сразу с началом мониторинга ЭМК было обнаружено новое явление: возрастание потока электромагнитных квантов при осадках. Амплитуда возрастания составляет десятки процентов, иногда доходя до 100 % по отношению к уровню, бывшему до начала непогоды. Профиль возрастания одинаковый по всем интегральным каналам, что указывает на большой энергетический диапазон данного явления. В год регистрируется до 100 событий. Длительность возрастаний зависит от длительности фазы интенсивного дождя или снегопада и может составлять многие часы. В этом случае наблюдаются несколько локальных максимумов, соответствующих увеличению скорости выпадения осадков (gr5.ru). Типичная же длительность одиночного события соответствует 2–4 ч. На рисунке 1 приведены примеры профилей событий возрастания в разных пунктах. Пик Хулугайша находится в Восточных Саянах, высота расположения станции — 2800 м. По профилям видно, что события возрастания происходят как за полярным кругом, так и в средней полосе, на равнине и в горах. Обычно события имеют резкий рост и более пологий спад, полная длительность составляет 2–6 ч, редко более, а максимум длится 1–2 ч. Для Апатитов показано аномально длительное событие, одно из тех, что исследуются в этой работе.

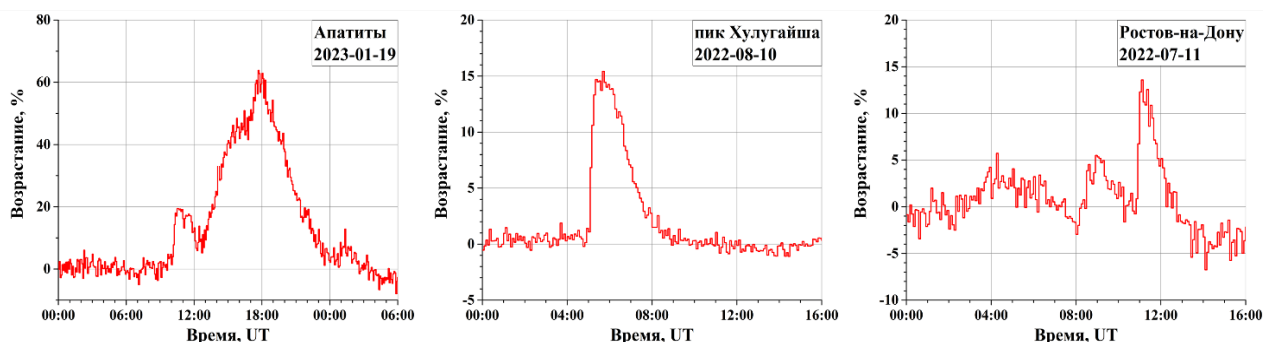


Рис. 1. Примеры профилей событий возрастания в различных пунктах наблюдения

Особенности и характеристики событий, их анализ даны в работах (Germanenko, 2011; Балабин, 2014). Отметим здесь кратко основные выводы.

1. Анализ осадков в радиологической лаборатории показал присутствие радионуклидов естественного происхождения лишь в следовых количествах. Проведение анализа занимает несколько дней, таким образом, этот анализ ничего не говорит о короткоживущих радионуклидах, которые за это время распались.

2. Оригинальный эксперимент с помещением собранных осадков сразу после сбора на второй детектор внутри свинцовой защиты. В собранных осадках никакой радиоактивности не было отмечено, детектор не отметил никакого возрастания, хотя количество собранной воды соответствует количеству осадков, одномоментно находящихся в воздухе до высоты ~ 100–120 м (Матвеев, 1984).

3. Возрастания происходят только в ЭМК. Имеющиеся детекторы заряженных частиц, входящие в комплексную систему регистрации ВКЛ в Апатитах и Баренцбурге, не показывают никакого возрастания при осадках. Это очень интересный и важный факт.

4. На научном судне, выполнявшем плавание в Баренцевом и Гренландском морях, был установлен детектор ЭМК, идентичный используемому. В течение трехнедельного плавания осенью 2020 г. были зарегистрированы несколько событий возрастания потока ЭМК. Записи в судовом журнале показывают, что в эти периоды наблюдался дождь или мокрый снег. Маршрут корабля проходил в открытом море, расстояние до суши составляло сотни километров. Результаты этого плавания представлены в работе (Балабин, 2022).

На основе перечисленных пунктов был сделан вывод, что события возрастания ЭМК, связанные с осадками, не обусловлены наличием радионуклидов в осадках или повышенным выделением радона из почвы в окружающую среду при осадках. Однако, этот вывод основан лишь на качественных измерениях.

Спектральные измерения в Апатитах

В 2022 г. комплексная система в Апатитах дополнилась измерителем дифференциального спектра (спектрометром) ЭМК. Используется спектрометрический кристалл NaI(Tl) размером $\varnothing 60 \times 60$ мм. Сигнал после усиления поступает на 4096-канальный амплитудный анализатор. Параметры электронного тракта подобраны так, что одна ячейка анализатора соответствует 1 кэВ по энергии. Время сбора одного спектра установлено 30 мин, рабочий энергетический диапазон — 0,1–4 МэВ. Спектрометр калиброван по линиям цезия-137, натрия-22, кобальта-60. Спектрометр помещен, как и другие детекторы ЭМК, в свинцовый стакан, стенки которого ограничивают поле зрения конусом примерно в 90° в области зенита. Разрешение спектрометра по линии 660 кэВ (цезий-137) составило 5,2 %, что является хорошим показателем для спектрометров такого типа.

На основе разработанного в лаборатории программного пакета RUSCOSMICS была вычислена эффективность регистрации спектрометром квантов разной энергии $Q(E)$ (Германенко, 2019). Использовался метод Монте-Карло, отслеживались все вторичные частицы с энергией выше 1 кэВ. Также были рассчитаны коэффициенты поглощения излучения материалом крыши здания и крышкой термобокса во всем рабочем диапазоне энергий $\mu(E)$ (Григорьев, 1991). Полученные зависимости $Q(E)$ и $\mu(E)$ используются для преобразования измеренного спектра в спектр первичного излучения, приходящего из атмосферы.

С момента установки летом 2022 г. в Апатитах дифференциального спектрометра электромагнитного излучения зарегистрировано более 80 событий возрастания ЭМК с амплитудой выше 10 %. Методика обработки данных и получения спектра излучения, вызвавшего возрастания, следующая. Непосредственно перед возрастанием выбирается интервал 5–8 ч, когда поток ЭМК держался на одной уровне. Путем усреднения вычислялся средний дифференциальный спектр ЭМК за указанный интервал $S_b(E)$. Это спектр фонового излучения. Такой большой интервал устанавливается для того, чтобы фоновый спектр имел малые флуктуации. Также выбирался интервал вблизи максимума возрастания, его типичное значение 1–2 ч, поскольку редко случается более длительное событие. За этот интервал также определялся средний спектр $S_1(E)$. Разность

$$S_{Inc}(E) = S_1(E) - S_b(E) \quad (1)$$

названа спектром возрастания, поскольку является спектром излучения, вызвавшего возрастание. На рис. 2 приведен пример спектров, полученных для одного из событий возрастания. На спектрах присутствуют

некоторые характерные линии. Следует отметить важные моменты. Во-первых, линия аннигиляции позитронов 511 кэВ и линия калия-40 1460 кэВ присутствуют на спектрах $S_b(E)$ и $S_l(E)$ всех событий. Отсутствие указанных линий на спектре возрастания $S_{inc}(E)$ означает, что вклад этих линий в $S_b(E)$ и $S_l(E)$ одинаков, то есть эти линии с осадками не меняют свою интенсивность. Линию калия-40 дают различные окружающие предметы, содержащие распространенный элемент калий: древесина, стены зданий. На фоновом спектре четко определяются линии 609 кэВ висмута-214 и линия 2600 кэВ таллия-208. На спектре возрастания $S_l(E)$ дополнительно появляются линии 352 кэВ (свинец-214), линии 1120 и 1750 кэВ (висмут-214) (Козлов, 1991). Эти же линии присутствуют и на спектре возрастания $S_{inc}(E)$. Все три спектра подобны, на всех трех спектрах имеются протяженные участки, где нет никаких линий. Это спектр ЭМК, возникающей при взаимодействии космических лучей с атмосферой, с добавлением отдельных линий радионуклидов. Наиболее сильной линией на спектрах всех событий является линия 609 кэВ. Она присутствует в фоновом спектре (при ясной погоде), в спектре $S_l(E)$ (при осадках) она усиливается, соответственно, в спектре возрастания (разностном) она тоже присутствует.

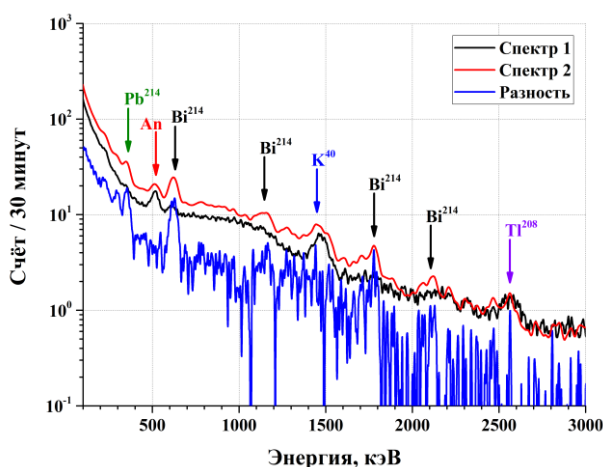


Рис. 2. Типичные спектры события. Событие 04.10.22. Черный — фоновый спектр $S_b(E)$, красный — спектр $S_l(E)$, синий — их разность, спектр возрастания $S_{inc}(E)$. Стрелками отмечены линии радионуклидов и линия аннигиляции 511 кэВ. Фоновый спектр для одного события постоянный, поскольку характеризует поток перед возрастанием

Наличие радионуклидов в осадках не вызывает вопросов. Естественные радионуклиды семейства урана и тория присутствуют в почве и различных минералах, попадают в воздух как летучие вещества (радон, например) и как пыль, поднимаются в атмосферу, а затем осадками захватываются и переносятся вниз (Искра, 1981; Зорина и др., 2008; Lee, 2017). Прямые измерения дифференциального спектра электромагнитного излучения, приходящего из атмосферы, показали, что радионуклиды присутствуют в осадках в незначительных количествах, что ранее дали и лабораторные исследования осадков. Прямые измерения спектра показали, что спектр возрастания подобен фоновому спектру перед возрастанием с добавлением небольшого числа линий естественных радионуклидов.

Типичное событие возрастания имеет длительность максимума 1–2 ч, соответственно, для каждого события получается один набор из трех спектров: $S_b(E)$, $S_l(E)$ и $S_{inc}(E)$. И хотя качественно видно, что спектр $S_{inc}(E)$ не определяется линиями радионуклидов, он имеет падающую зависимость от энергии, на которой присутствуют отдельные линии. Однако следует для ясности установить эту независимость от линий радионуклидов в количественном виде. Определим интегральные величины для характеристики спектра. Если не оговорено другое, все они относятся к спектру возрастания $S_{inc}(E)$:

$$N_t = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} S_{inc}(E) \cdot dE, \quad (2)$$

где $E_{\max}$ и $E_{\min}$ — верхний и нижний энергетический пределы измерения спектра. Величина N_i дает общее число квантов, попавших в кристалл спектрометра за время сбора спектра.

$$F = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} S_{\text{Inc}}(E) \cdot E \cdot dE. \quad (3)$$

Величина F выражает полную энергию, принесенную квантами за время сбора спектра. В данной работе выражается в МэВ. Средняя по спектру энергия есть полная энергия F , деленная на общее число квантов N_i :

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

Средняя по спектру энергия может вычисляться для разных видов спектра: базового или спектра возрастания, именно поэтому спектральная функция $S(E)$ дана без индексов. Вычисляется в МэВ:

$$N_i = \int_{E_{i,1}}^{E_{i,2}} (S_{\text{Inc}}(E) - Z_i(E)) \cdot dE, \quad (5)$$

где i — порядковый номер радионуклидной линии в спектре; $E_{i,1}$ и $E_{i,2}$ — нижняя и верхняя границы линии; $Z_i(E)$ — функция, интерполирующая спектр на участке расположения данной линии без учета самой линии. На рис. 2 заливкой линии 609 кэВ показан пример вычисления.

$$N_{\text{nuc}} = \sum_i N_i, \quad (6)$$

$$F_{\text{nuc}} = \sum_i N_i \cdot E_i, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{\text{nuc}} = F_{\text{nuc}} / N_{\text{nuc}}. \quad (8)$$

Из названных характеристик вычисляются дополнительно вспомогательные величины. Например, удельная энергия — вся энергия, поступившая в кристалл, деленная на амплитуду возрастания. Она может быть вычислена для всего потока или отдельно для каких-то линий.

Для событий с амплитудой 10–20 % удовлетворительная точность измерения спектра возрастания достигается только при усреднении нескольких спектров, в одиночном спектре при энергиях > 1000 кэВ наблюдаются значительные флуктуации, затрудняющие определение линий радионуклидов. В большинстве спектров максимум длится 2–3 ч, что означает: на все возрастание получается в итоге одно измерение спектра. В результате обработки набора из трех спектров $S_b(E)$, $S_l(E)$ и $S_{\text{Inc}}(E)$, соответствующих одному событию, получается несколько интегральных характеристик, вычисляемых по формулам (2–6). Результаты анализа десятков событий возрастания на основе полученных спектров представлены в работе (Балабин, 2023). Вывод, сделанный в работе (Балабин, 2023), однозначен: возрастания ЭМК, происходящие во время осадков, не обусловлены наличием радионуклидов в осадках, хотя радионуклиды присутствуют и обеспечивают вклад ~ 10 % от общего возрастания.

Как сказано выше, проследить динамику спектральных характеристик на протяжении события в большинстве случаев не представляется возможным, поскольку типичное событие возрастания обеспечивает одно измерение спектра около максимума. Однако зарегистрированы 4 события возрастания, когда поток излучения возрос более чем на 20 %, и такой уровень держался много часов (рис. 1). Все события произошли в период, когда средняя суточная температура не стала отрицательной, а осадки были в форме дождя. Чем больше текущая амплитуда, тем меньшее число спектров требуется для получения рабочего спектра, обладающего приемлемой точностью. В данной работе внимание сосредоточено именно

на событиях с большой длительностью. Большая амплитуда позволяет обойтись при усреднении двумя измерениями спектров, то есть получать параметры спектров с шагом в 1 ч. Если событие длится много часов, то получим ряд характеристик спектров в последовательные моменты времени. На рисунке 3 показан профиль одного такого события. Незадолго до полудня произошло обособленное возрастание с небольшой амплитудой, к 13 UT уровень излучения вернулся к базовому уровню. В наш анализ оно не вошло. Затем около 15 UT начался дождь, продолжавшийся до 22 UT. Имеются три длительных максимума. Решено использовать скользящее окно длительностью 1 ч. Первый интервал взят с 16 по 17 UT, из двух получасовых спектров получен средний, и за этот же интервал 16–17 ч вычислена средняя амплитуда возрастания; затем взят интервал 16:30–17:30 UT, и все операции повторены и т. д.

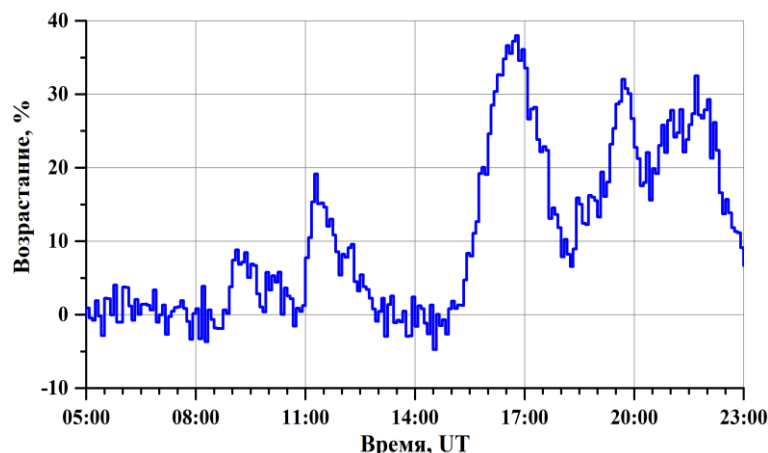


Рис. 3. Профиль одного из длительных событий возрастания 19.08.22. После 15 UT возрастание можно считать одним событием с несколькими максимумами, дождь то усиливался, то ослабевал, но шел не переставая. Использован канал > 100 кэВ интегрального детектора. Пятиминутное усреднение. Скорость счета детектора при ясной погоде перед возрастанием ~ 7 тыс. импульсов, ошибка, связанная с флуктуациями счета, составляет менее 1 %, ею можно пренебречь, видимые на профиле колебания счета отражают изменения потока излучения

В результате обработки спектров этих длительных событий получен набор интегральных характеристик, аналогичных тем, что анализировались в работе (Балабин, 2023). Только теперь каждое семейство характеристик соответствует одному длительному событию. На рисунках 4 и 5 показаны некоторые характерные зависимости. В общем они подобны полученным ранее по 8 десяткам разных событий, но тогда из каждого события использовался только один спектр вблизи максимума. Проявляется такая же линейная зависимость числа квантов какой-либо линии радионуклида от амплитуды возрастания. Это выполняется для всех достаточно сильных линий на спектре.

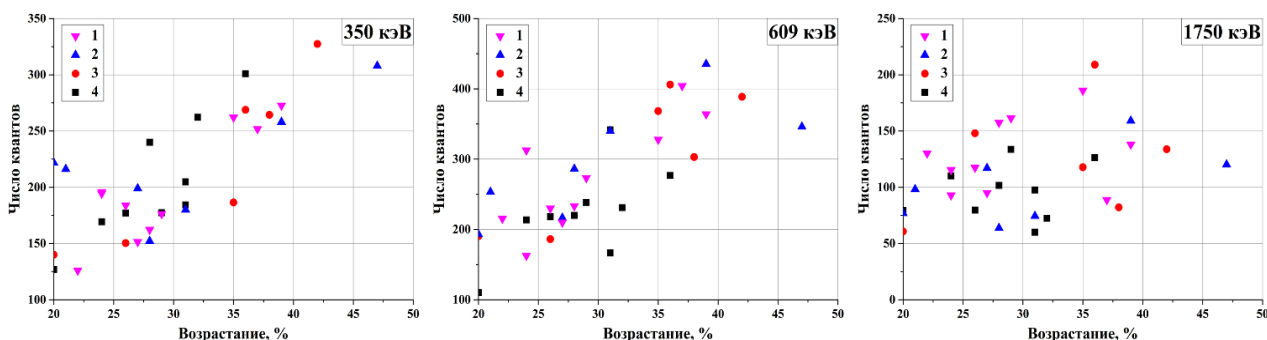


Рис. 4. Вклад некоторых линий радионуклидов в зависимости от текущей амплитуды возрастания. По ОУ — количество квантов данной линии, поступивших в кристалл за время сбора спектра, вычислено по формуле (5). ОХ — средняя амплитуда за тот же интервал времени. Цифры 1–4 соответствуют четырём событиям

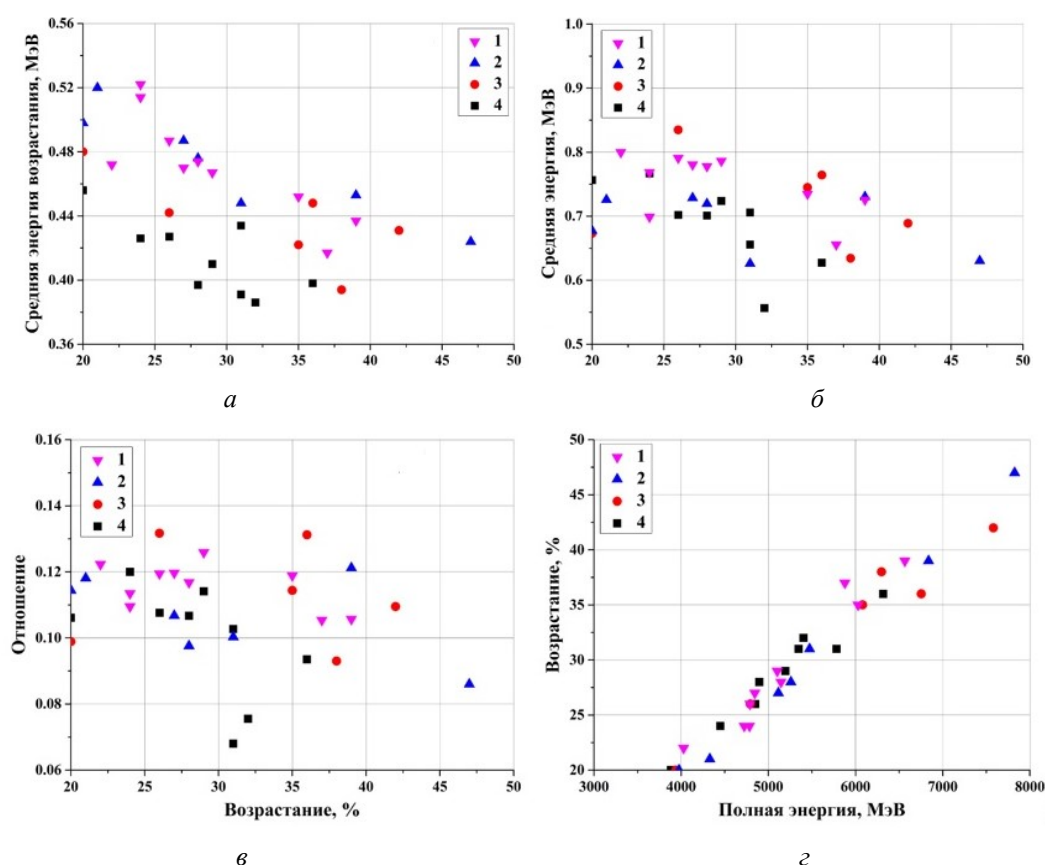


Рис. 5. Зависимость средней энергии спектра возрастания от текущей амплитуды (а). Зависимость средней энергии квантов, испущенных радионуклидами, от текущей амплитуды (б). Отношение энергии, принесенной в кристалл квантами радионуклидов, к полной энергии, поступившей в кристалл (в). Зависимость текущей амплитуды возрастания от полной энергии, поступившей в кристалл (г).

Обсуждение

Представленные зависимости хорошо согласуются с полученными ранее (Балабин, 2023), хотя там для каждого события в анализе использовалась область максимума возрастания. Характеристики, полученные из спектров 8 десятков разных событий, не отличаются от характеристик 4 длительных событий, которые также обеспечили измерение десятков спектров. Важно иметь в виду, что время жизни свинца-214 и висмута-214 составляет десятки минут, поэтому они не могут быть захвачены и принесены осадками издалека. Эти радионуклиды попадают в осадки из атмосферы непосредственно над местом наблюдений.

Линейная связь между амплитудой и количеством квантов, поступивших от радионуклидов в осадках будто бы указывает на то, что само возрастание целиком производится радионуклидами, попавшими в осадки. Но уже в работе (Балабин, 2023) однозначно показано, что радионуклиды в осадках хоть и присутствуют, но являются определяющим фактором.

Если обратиться к рис. 4, можно заметить, что разброс количества поступивших квантов велик при почти одинаковой амплитуде возрастания. Например, количество квантов, поступивших в четвертом событии (черные квадратики) по линии 350 кэВ меняется от ~ 170 до ~ 260 при том, что амплитуда практически неизменна 32–33 %. Подобное же происходит и в третьем событии (красные кружки): 170–260 квантов, а амплитуда 35–37 %. То есть амплитуда возрастания сохраняется почти постоянной, а вклад линии радионуклида изменяется на 50 %. И подобное наблюдается во всех линиях, причем такие вариации синхронны по всем линиям (ср. положение точек на разных графиках рис. 4). В то же время вариации полной энергии (рис. 5г) для этих же значений амплитуды и этого же события (черные квадратики, 32–33 %) составляет всего 10 % (5200–5700 МэВ). Но количество поступивших квантов какой-либо линии пропорционально связано с содержанием соответствующего радионуклида в осадках. Следовательно, существенные вариации (до 50 %) содержания радионуклидов не ведут в таком же значительным вариациям полной энергии, поступившей в кристалл.

Такая интегральная характеристика спектра, как средняя энергия, показывает (рис. 5а) постоянство при амплитудах 25–50 %. В каждом из 4 событий при увеличении амплитуды средняя энергия немного падает при значениях до 25 %, а далее с ростом амплитуды держится на одном уровне. Кроме того, средняя энергия квантов, поступивших от радионуклидов, почти в 2 раза больше, чем средняя энергия всего спектра. Следовательно, в спектре возрастания квантов не радионуклидной природы много больше, за их счет уменьшается средняя энергия. Также показателен график рис. 5в. Энергетический вклад всех присутствующих в спектре линий радионуклидов составляет ~ 0,1 от общего потока энергии в кристалл и имеет тенденцию уменьшаться с ростом амплитуды, что указывает на отсутствие влияния радионуклидов на эффект возрастания ЭМК. Можно сделать уверенный вывод, что исходя из анализа характеристик спектров, измеренных во время длительных событий возрастания ЭМК, эти возрастания не обусловлены наличием радионуклидов в осадках.

Достаточно четкая линейная связь между амплитудой возрастания и полной выделившейся энергией в кристалле (рис. 5г), вычисляемой по формуле (3), самым простым образом объясняется тем, что поток ЭМК изменяет интенсивность, а форма спектра остается неизменной. Неизменность формы спектра подтверждает и постоянство значений средней энергии спектра. Изменение наклона спектра приводило бы к изменению средней энергии.

Линейная же связь амплитуды возрастания и количества радионуклидов в осадках может быть объяснено следующим образом. Измерение скорости осадков на ст. Апатиты (Балабин, 2014) одновременно с измерением ЭМК показало, что амплитуда возрастания следует за скоростью выпадения осадков, немного отставая по времени; чем интенсивнее осадки, тем амплитуда возрастания больше. Авторы придерживаются гипотезы, что возрастания ЭМК вызваны изменением условий взаимодействия ВКЛ с атмосферой при активных метеорологических процессах. Вполне естественно предположить, что усиление метеорологических явлений вызывает усиление этого влияния. В то же время усиление интенсивности осадков означает более высокую плотность капель, находящихся в воздухе в поле зрения спектрометра и, соответственно, усиление интенсивности линий радионуклидов. По этой причине возникает линейная связь между количеством радионуклидов в осадках и амплитудой возрастания.

Заключение

Представлен результат анализа спектральных измерений ЭМК во время длительных событий возрастания ЭМК. Измерения спектра ЭМК с приемлемой точностью возможны при накоплении спектра в течение 1–2 ч. Типичное событие возрастания ЭМК при осадках длится 1–2 ч, так что ранее проведенный анализ использовал каждое событие как одно измерение, соответствующее наибольшему возрастанию. Однако зарегистрированы 4 события возрастания большой длительности (6–12 ч), для которых возможно выполнить несколько спектральных измерений и, проведя анализ спектров, выявить возможные отличия характеристик спектров в длительных событиях. Никаких отличий не обнаружено. Характеристики, полученные из анализа спектров в 8 десятках событий возрастных, и характеристики, полученные из 4 событий большой длительности, в пределах статистических ошибок, совпадают. Соответственно, вывод аналогичен полученному ранее: связанные с осадками события возрастания потоков ЭМК не обусловлены наличием радионуклидов в осадках. Этот вывод относится как к коротким событиям возрастания (1–2 ч), так и к самым длительным событиям, длившимся до 12 ч.

Список источников

1. Балабин Ю. В., Германенко А. В., Гвоздевский Б. Б., Вашенюк Э. В. Вариации естественного рентгеновского фона в полярной атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 3. С. 376–386. DOI 10.7868/S0016794014020023.
2. Балабин Ю. В., Германенко А. В., Михалко Е. А., Маурчев Е. А., Ларченко А. В. 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.
3. 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. (принято в печать).

4. Бельский С. З. Лавинные процессы в космических лучах. М.: Гостехиздат, 1948. 244 с.
5. Германенко А. В., Маурчев Е. А., Балабин Ю. В. Расчет функций эффективности регистрации сцинтилляционных детекторов NaI(Tl) 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.
6. Григорьев И. С., Мелихов Е. З. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.
7. Дорман Л. И. Метеорологические эффекты космических лучей, М.: Наука, 1972. 212 с.
8. Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей, М.: Наука, 1975. 402 с.
9. Зорина Л. В., Бураева Е. А., Давыдов М. Г., Стасов В. В. Радионуклид ^{210}Pb в атмосферных аэрозолях в приземном слое воздуха и метеопараметры г. Ростова-на-Дону // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2008. № 5. С 108–113.
10. Искра А. А. Бахуров В. Г. Естественные радионуклиды в биосфере. М.: Энергоатомиздат, 1981. 123 с.
11. Козлов В. Ф. Справочник по радиационной безопасности. 4-е изд., М.: Энергоатомиздат, 1991. 352 с.
12. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии, Л.: Гидрометеиздат, 1984. 752 с.
13. Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей, М.: Изд-во МГУ, 1988. 320 с.
14. Хаякава С. Физика космических лучей. Ч.1: Ядерно-физический аспект; Ч.2: Астрофизический аспект, М.: Наука, 1974. 1042 с.
15. Germanenko A. V., Balabin Yu. V., Vashenyuk E. V., Gvozdevsky B. B., Schur L. I. High-energy photons connected to atmospheric precipitations. *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011. V 7, Iss. 4. P. 471–475. DOI 10.5194/astra-7-471-2011.
16. Lee M. S. Gamma-ray Exposure Rate Monitoring by Energy Spectra of NaI(Tl) Scintillation detectors. *Journal of Radiation Protection and Research.* 2017. V. 42, Iss. 3. P. 158–165. DOI 10.14407/jrpr.2017.42.3.158.

References

1. Balabin Ju. V., Germanenko A. V., Gvozdevskij B. B., Vashenjuk Je. V. Variacii estestvennogo rentgenovskogo fona v poljarnoj atmosphere [Variations in the natural X-ray background in the polar atmosphere]. *Geomagnetizm i ajeronomija* [Geomagnetism and Aeronomy], 2014, vol. 54, no. 3, pp. 376–386. (In Russ.).
2. Balabin Ju. V., Germanenko A. V., Mihalko E. A., Maurchev E. A., Larchenko A. V. Nabljudenie variacij potokov vtorichnyh kosmicheskikh luchey vo vremja morskoy jekspedicii v severnom ledovitom okeane [Observation of variations in secondary cosmic ray fluxes during a marine expedition in the Arctic Ocean]. *Izvestija RAN. Serija fizicheskaja* [Bulletin of the RAS: Physics], 2022, vol. 86, no. 3, pp. 360–364. (In Russ.).
3. Balabin Ju. V., Germanenko A. V., Gvozdevskij B. B., Maurchev E. A., Mihalko E. A. Svjazannye s osadkami sobytija vozrastanija jelektromagnitnoj komponenty vtorichnyh kosmicheskikh luchey: spektral'nye izmerenija i analiz [Precipitation-Related Events of an Increase in the Electromagnetic Component of Secondary Cosmic Rays: Spectral Measurements and Analysis]. *Solnechno-zemnaja fizika* [Solar-terrestrial physics], 2023, (accepted for publication). (In Russ.).
4. Belen'kii S. Z. *Lavinnye Protsessy v Kosmicheskikh Luchakh* [Avalanche-Type Processes in Cosmic Rays]. Moscow, Gostekhizdat, 1948, 244 p. (In Russ.).
5. Germanenko A. V., Maurchev E. A., Balabin Yu. V. Raschet funkcij effektivnosti registracii scintillyacionnyh detektorov NaI(Tl) i sravnenie raboty modeli s dannymi real'nogoeksperimenta. [Calculation of registration efficiency functions of NaI(Tl) scintillation detectors and comparison of model operation with real experiment data]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the RAS], 2019, vol. 10, no. 8–5, pp. 82–87, doi 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8.82-87. (In Russ.).
6. Grigoriev I. S., Melikhov E. Z. *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* [Physical quantities. Directory.]. Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1231 p. (In Russ.).
7. Dorman L. I. *Meteorologicheskie efekty kosmicheskikh luchey* [Meteorological effects of cosmic rays]. Moscow, Nauka, 1972, 212 p. (In Russ.).
8. Dorman L. I. *Ekspperimental'nye i teoreticheskie osnovy astrofiziki kosmicheskikh luchey* [Experimental and Theoretical Foundations of Astrophysics of Cosmic Rays]. Moscow, Nauka, 1975, 402 p. (In Russ.).
9. Zorina L. V., Buraeva E. A., Davydov M. G., Stasov V. V. Radionuklid ^{210}Pb v atmosferynaerorozolyah v prizemnom sloe vozduhaimeteoroparmetry g. Rostov-na-Donu [Radionuclide ^{210}Pb in atmospheric aerosols in the surface air layer and meteorological parameters of the city of Rostov-on-Don]. *Izvestiyavuzov. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Estestvennyenauki* [News of universities. North Caucasian region. Series: Natural Sciences], 2008, no. 5, pp. 108–113. (In Russ.).

10. Iskra A. A. Bakhurov V. G. *Estestvennyeradionuklidy v biosphere* [Natural radionuclides in the biosphere]. Moscow, Energoatomizdat, 1981, 123 p. (In Russ.).
11. Kozlov V. F. *Spravochnik po radiacionnojbezopasnosti* [Radiation Safety Handbook]. Moscow Energoatomizdat, 1991, 352 p. (In Russ.).
12. Matveev L. T. *Kurs obshchej meteorologii* [Course of general meteorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984, 752 p. (In Russ.).
13. Murzin V. S. *Vvedenie v fiziku kosmicheskikh luchej* [Introduction to the physics of cosmic rays]. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1988, 320 p. (In Russ.).
14. Hajakava S. *Fizika kosmicheskikh luchej. Ch. 1: Jaderno-fizicheskij aspekt; ch. 2: Astrofizicheskij aspekt* [Physics of cosmic rays. Part 1: Nuclear-Physical Aspect; part 2: Astrophysical aspect]. Moscow, Nauka Publ, 1974, 1042 p. (In Russ.).
15. Germanenko A. V., Balabin Yu. V., Vashenyuk E. V., Gvozdevsky B. B., Schur L. I. High-energy photons connected to atmospheric precipitations. *Astrophys. Space Sci. Trans.*, 2011, vol. 7, iss. 4, pp. 471–475, doi 10.5194/astra-7-471-2011.
16. Lee M. S. Gamma-ray Exposure Rate Monitoring by Energy Spectra of NaI(Tl) Scintillation detectors. *Journal of Radiation Protection and Research*, 2017, vol. 42, iss. 3, pp. 158–165, doi 10.14407/jrpr.2017.42.3.158

Информация об авторах

Ю. В. Балабин — кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, <https://orcid.org/0000-0002-1256-6728>;
А. В. Германенко — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5129-9426>;
Е. А. Маурчев — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2028-4613>;
Е. А. Михалко — инженер, <https://orcid.org/0000-0002-1534-9614>;
Б. Б. Гвоздевский — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-1643-798X>.

Information about the author

Yu. V. Balabin — Ph.D., head. laboratory, <https://orcid.org/0000-0002-1256-6728>;
A. V. Germanenko — Ph.D., researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5129-9426>;
E. A. Maurchev — Ph.D., senior researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2028-4613>;
E. A. Michalko — engineer, <https://orcid.org/0000-0002-1534-9614>;
B. B. Gvozdevsky — Ph.D., researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1643-798X>.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023; принята к публикации 03.05.2023.
The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 17.04.2023; accepted for publication 03.05.2023.