

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.024

ПОРТАТИВНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЭФФЕКТА ВОЗРАСТАНИЯ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ

Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздевский

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

Абстракт. В ПГИ разработан и создан портативный спектрометр гамма-излучения на диапазон 0.1-4 МэВ. За основу взят ранее созданный стационарный спектрометр гамма-излучения. Назначение спектрометра: измерение дифференциальных спектров в событиях возрастания потока гамма-излучения, вызываемых осадками, в поездках и экспедициях. С помощью этого спектрометра в теплый сезон в течение двух месяцев проводился мониторинг спектров гамма-излучения в средних широтах. Зарегистрировано несколько событий возрастания гамма-излучения во время гроз, измерен спектр излучения. Проведен анализ и сравнение со спектрами во время возрастных в Апатитах, дано объяснение отличиям.

1. Введение

Наблюдение вариаций электромагнитной компоненты (рентгеновское и гамма-излучение) вторичных космических лучей (ВКЛ) проводится лабораторией Космических лучей много лет, детекторы установлены на нескольких станциях, располагающихся от высоких до средних широт. Используются однотипные детекторы на основе сцинтилляционных кристаллов, эффективных в диапазоне энергий 20-600 кэВ. Регистрируется полный поток выше некоторого порога. Эти детекторы недорогие, их изготовлено достаточно много экземпляров. Анализ полученных данных показал, что на всех станциях отмечаются возрастания, связанные с выпадением осадков. Это очень интересное явление, возможно, оно указывает на некий механизм взаимодействия метеорологических процессов в атмосфере с ВКЛ. Было бы весьма полезно исследовать и сравнить спектры излучения во время возрастания в различных пунктах. Однако, интегральные детекторы не дают информации о спектральных характеристиках излучения.

Спектральные измерения требуют применения в качестве детектора кристаллы с лучшими параметрами и гораздо большее быстродействие регистрирующей системы. Дифференциальный спектрометр гамма-излучения был создан и установлен в 2022 г. только в Апатитах. С его помощью были получены энергетические спектры гамма-излучения в ясную погоду и во время дождя, их анализ четко показал: радионуклиды присутствуют в осадках в следовых количествах и обеспечить наблюдаемое возрастание не способны [1]. Но такой вывод касается только станции Апатиты. Обеспечить остальные пункты наблюдений подобными спектрометрами не представляется возможным. Был создан портативный спектрометр, позволяющий проводить измерения спектра гамма-излучения не только во время посещений других станций, но и в любых поездках и экспедициях. Это позволит провести наблюдения указанного явления на большем числе пунктов, осуществить измерения спектральных характеристик в различных геофизических условиях.

2. Описание прибора

Портативный спектрометр гамма-излучения на диапазон 0.1-4 МэВ, созданный в лаборатории Космических лучей, аналогичен ранее созданному в лаборатории дифференциальному спектрометру, интегрированному в комплексную систему мониторинга космических лучей (КЛ) в Апатитах [1]. Отличие портативного спектрометра в том, что использованы более компактные и легкие электронные блоки, размещенные в одном корпусе, а также используется одноплатный мини-компьютер из линейки моделей Raspberry. Запись спектров производится на встроенную флэш-память. Объем памяти достаточно для записи данных за 1 год. Предусмотрено подключение съемных носителей (флэшек), на которые автоматически копируются накопленные данные из встроенной памяти.

Основу спектрометра (см. рис.1) составляет спектрометрический кристалл NaI(Tl) размером $\varnothing 75 \times 75$ мм. Кристалл и ФЭУ образуют неразъемный блок, опрессованный алюминием. Этот блок имеет разъемное соединение с основанием, в которое он вставляется; в основании находится преусилитель-формирователь. В основном блоке находятся все остальные элементы и электрические платы, за исключением выносной приемной антенны. В блоке размещены источники питания низкого и высокого напряжения, усилитель, дискриминаторы на заданные пороги энергии, амплитудный анализатор, GPS-приемник, мини-компьютер и вспомогательные датчики атмосферного давления и температуры. На корпусе блока установлен

миниатюрный LCD-экран. На экран выводятся текущие значение счета в интегральных каналах и служебная информация, по которой можно судить о корректной работе спектрометра.



Рисунок 1. Общий вид портативного спектрометра. Справа: кристалл с ФЭУ в алюминиевом корпусе. В пластиковом корпусе основания находится предусилитель и высоковольтный делитель для ФЭУ. Слева: рабочий блок, в котором размещены блоки питания высокого и низкого напряжения, усилитель, дискриминаторы, GPS-приемник, мини-компьютер и прочие вспомогательные элементы. Приемная антенна для GPS на снимке не присутствует.

Основные характеристики портативного спектрометра:

1. Питание – 220 В,
2. Потребление – менее 20 Вт,
3. Размер кристалла NaI(Tl) – $\varnothing 75 \times 75$ мм,
4. Энергетическое разрешение – 5.7 % (для линии 660 кэВ),
5. Количество каналов амплитудного анализатора – 4096,
6. Емкость внутренней памяти для хранения данных – 8 Гб,
7. Время сбора одного спектра – 30 мин,
8. Дискретность записи в интегральных каналах – 1 мин,
9. Коррекция часов автоматическая, по GPS приемнику,
10. Копирование данных при подключении внешнего накопителя – автоматическое,
11. Размеры экрана для вывода служебной информации – 240×240 точек.

GPS-приемник u-blox NEO-7M с выносной антенной используется для коррекции часов компьютера. Коррекция времени производится каждый 30 мин. В качестве амплитудного анализатора применяется двухходовый спектрометрический аналого-цифровой преобразователь типа Вилкинсон 4К-САЦП-USB. Коэффициент усиления электронного тракта подобран так, что один канал амплитудного анализатора соответствует 1 кэВ энергии. Поскольку портативный спектрометр предназначен для быстрого и легкого перемещения, он не имеет термозащиты и подвержен температурным колебаниям согласно местным погодным условиям. Это приводит к тому, что в каждом событии коэффициент пересчета номера канала в энергию точно определяется по эталонным линиям известных радионуклидов, постоянно присутствующих на спектре. Одна из этих линий - 1460 кэВ от калия-40, вторая - линия 609 кэВ от висмута-214.

В памяти сохраняются два типа данных. В суточный файл записываются интегральные потоки излучения с энергиями >100, >200, >1000 кэВ. В него же пишутся данные о температуре, давлении и работе приемника GPS. Частота записи этих данных – 1 минута.

Отдельно по мере сбора сохраняются дифференциальные спектры излучения. Выходной файл спектра содержит номера амплитудных каналов и количество отсчетов в этих каналах. Пересчет в энергию осуществляется при обработке данных, при этом, как указано выше, по наиболее интенсивным и характерным линиям радионуклидов проверяется верность шкалы пересчета номеров каналов в энергию, при необходимости коэффициент пересчета корректируется.

Портативный спектрометр был калиброван по линиям известных радионуклидов: цезия-137, калия-40, натрия-22, кобальта-60. При этом разрешение составило 5.7 % по линии 660 кэВ (цезий-137). Время сбора одного дифференциального спектра установлено таким же, как у стационарного аналога: 30 мин.

Основное отличие портативного спектрометра от стационарного в следующем. Во-первых, портативный спектрометр имеет большой объем памяти и способен сохранять накопленные данные в ней. Его не требуется подключать к компьютеру-сборщику, который хранит данные. При подключении внешнего USB-накопителя происходит автоматическое копирование данных на подсоединенный носитель. Это упрощает съем данных со спектрометра, не требуется участие оператора с компьютером. Во-вторых, портативный спектрометр не имеет свинцовой защиты и принимает излучение со всех сторон от окружающих объектов. Это в несколько раз увеличивает поток излучения, поступающего в кристалл, однако, для дифференциальных измерений это не должно создавать сложности при определении линий радионуклидов и формы спектра. Детектор стационарного спектрометра имеет свинцовую защиту толщиной 50 мм, которая ограничивает прием излучения областью около зенита порядка 1.5 ср.

3. Проведение измерений и полученные результаты

Явление возрастания гамма-излучения изучается лабораторией Космических лучей достаточно долго и в разных пунктах. Выяснено, что возрастания происходят в различных климатических и геофизических зонах (высокие и средние широты, равнины и высокогорье) круглый год. Значимые возрастания (>10 %) сопровождаются осадками в подавляющем числе случаев и наблюдаются круглый год. На основе накопленного за много лет массива данных был проведен статистический анализ параметров событий возрастаний: длительность, амплитуда, полный поток энергии и пр. [2, 3]. Косвенные признаки указывают, что радионуклиды в осадках присутствуют в следовых количествах и не является причиной возрастаний [4]. Однако, до последнего времени возрастания регистрировались интегральными детекторами, получить подробную информацию о спектральных характеристиках излучения не представлялось возможности. Поэтому количественно определить наличие радионуклидов в осадках и их вклад в возрастание потока излучения не было возможности.

В 2022 г. в Апатитах был начат мониторинг гамма-излучения в диапазоне 0.1-4 МэВ с помощью дифференциального спектрометра. Результаты представлены в [1]. Спектральные измерения выполнялись с помощью стационарного спектрометра. Для надежных выводов следовало провести спектральные измерения в других пунктах хотя бы некоторое время и сравнить результаты. Именно для этой задачи был создан мобильный спектрометр, по основным характеристикам аналогичный стационарному.

Во время поездки в летний период портативный спектрометр был установлен в ст. Тацинской, Ростовской области. Лето в этом регионе характеризуется дневными температурами более +30°C с малой влажностью (типична влажность менее 30-40 %) и ветрами [5]. Днем при ясной погоде обычно развивается кучевая облачность, но облака не сливаются в общую массу, к вечеру небо полностью очищается до следующего утра. Спектрометр размещался в легком деревянном строении на высоте около 1 м от бетонного пола. Количество вещества над ним оценено в 4-5 г/см², которое создавалось легкой деревянной крышей.

Непрерывное измерение спектра гамма-излучения проводилось с конца июня по начало сентября. За это время отмечены 9 дождей разной интенсивности от сильного ливня до легкой мороси [5]. Зарегистрировано 9 событий возрастания потока гамма-излучения, причем 7 из них превысили порог 20 % по каналу >100 кэВ, а наибольшее возрастание составило 68 %. В Апатитах за тот же период отмечено 21 возрастание, и только 8 событий превысили порог 20 %, наибольшая амплитуда отмечена в 37 %. На рис.2 показаны профили возрастаний в Апатитах и в Тацинской. Также заметен более крутой фронт возрастания в Тацинской, это отражает тот факт, что летние дожди там происходят в форме ливня: резкое внезапное начало [5]. Число событий зависит от климата: в Ростовской области лето засушливое, дожди случаются редко, соответственно, и возрастаний мало. Однако, их амплитуда в Тацинской заметно выше, чем в Апатитах и тем более в Баренцбурге. Подтверждается ранее полученный по анализу событий в Апатитах и Баренцбурге вывод: амплитуда событий в среднем увеличивается с переходом к более низким широтам. А как проявляется увеличение средней амплитуды в спектрах? По измерениям в течение года спектров излучения в Апатитах сделан вывод, что возрастание приводит к увеличению потока излучения на всех энергиях до порога в 2.5 МэВ [1]. А каковы спектральные особенности возрастаний на средних широтах? Линии каких радионуклидов и в какой степени будут присутствовать?

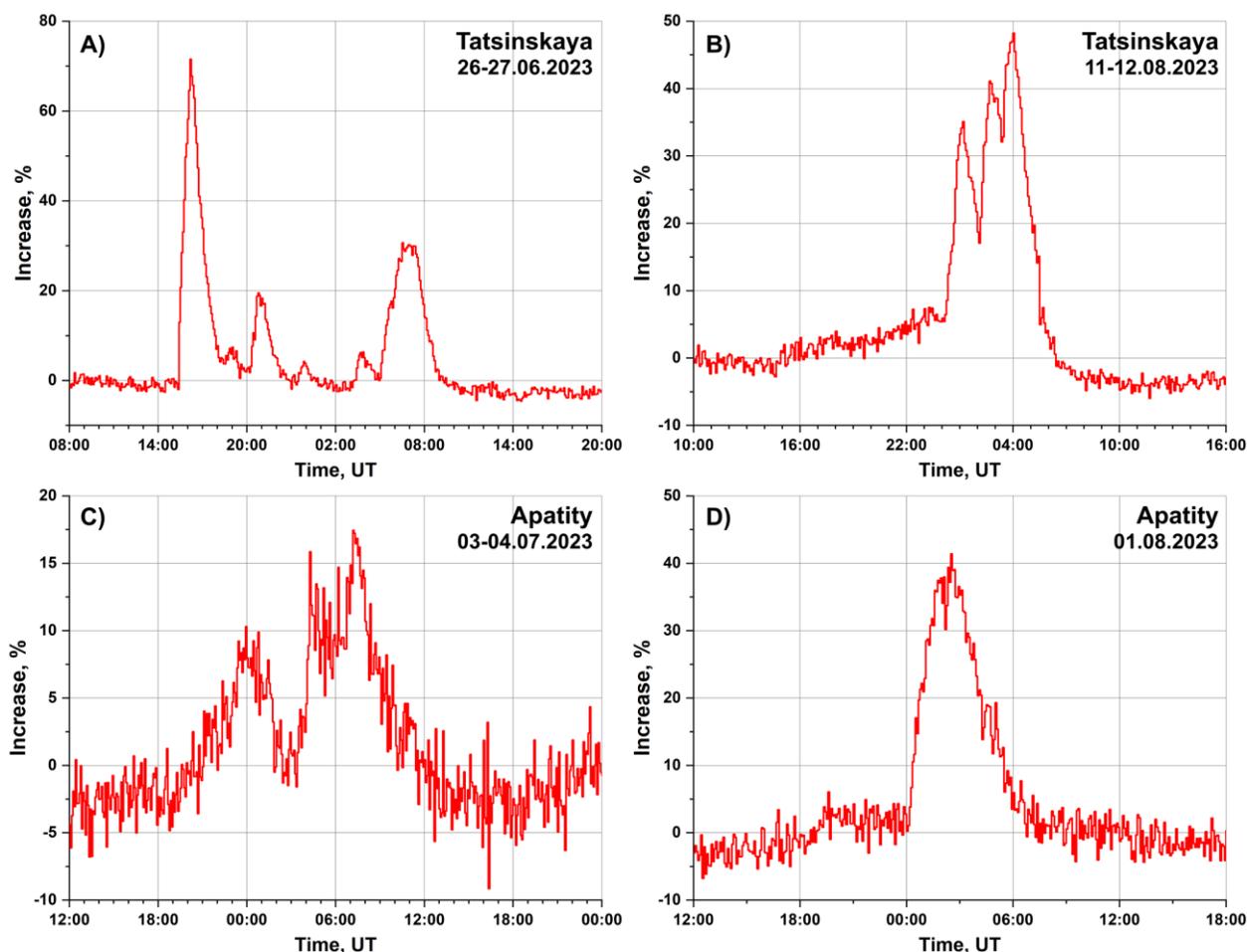


Рисунок 2. Профили возрастаний в Тацинской и Апатитах. **А)** – возрастание с наибольшей амплитудой за двухмесячный период наблюдений; **В)** – типичное событие возрастания; **С)** – типичное возрастание в Апатитах; **Д)** – возрастание с наибольшей амплитудой за тот же двухмесячный период. Каждый локальный максимум на профилях соответствует усилению дождя. Использовано пятиминутное усреднение данных по каналу >100 кэВ.

Кратко остановимся на методике определения дифференциальных спектров гамма-излучения, которая описана в [1]. Единичный спектр имеет значительные флуктуации, поэтому по возможности применяется усреднение нескольких спектров, собранных за длительный интервал. Перед возрастанием всегда имеется довольно продолжительный отрезок времени (от нескольких часов до суток), когда поток гамма-излучения держится примерно на одной уровне. Спектры за этот интервал усредняются, полученный средний и обозначается как базовый спектр. Спектры, измеренные в период около максимума возрастания, тоже усредняются, итоговый обозначается как спектр возрастания. Вычисляемая разность между спектром возрастания и базовым спектром является спектром дополнительного потока излучения (СДП), который, собственно, создает наблюдаемое возрастание. Таким образом, для каждого возрастания находится тройка средних спектров. Естественно, чем больше амплитуда возрастания, тем лучше определяется СДП. При амплитудах $<10\%$ СДП имеет настолько сильные флуктуации, что анализ его невозможен. По этой причине установлен нижний порог амплитуды возрастания 10% для спектральных измерений.

Проведение в течение двух месяцев спектральных измерений в ст. Тацинской позволило сравнить спектры событий в двух регионах. Примеры спектров в Апатитах и в Тацинской показаны на рис.3. Для лучшего выявления различий использованы события с амплитудой $>30\%$, суммированием всех базовых спектров от разных событий получен средний базовый спектр, аналогично для спектра возрастания, а СДП получен как разность этих двух. Для Тацинской за двухмесячный период наблюдения таких событий 5, наибольшее возрастание наблюдалось в 68% , для Апатитов подобных событий отобрано 9 за весь период выпадения жидких осадков (с мая по октябрь), наибольшая амплитуда составила 47% . Включение в Апатитах всего теплого периода с жидкими осадками связано с тем, что за двухмесячный интервал таких событий отмечено слишком мало.

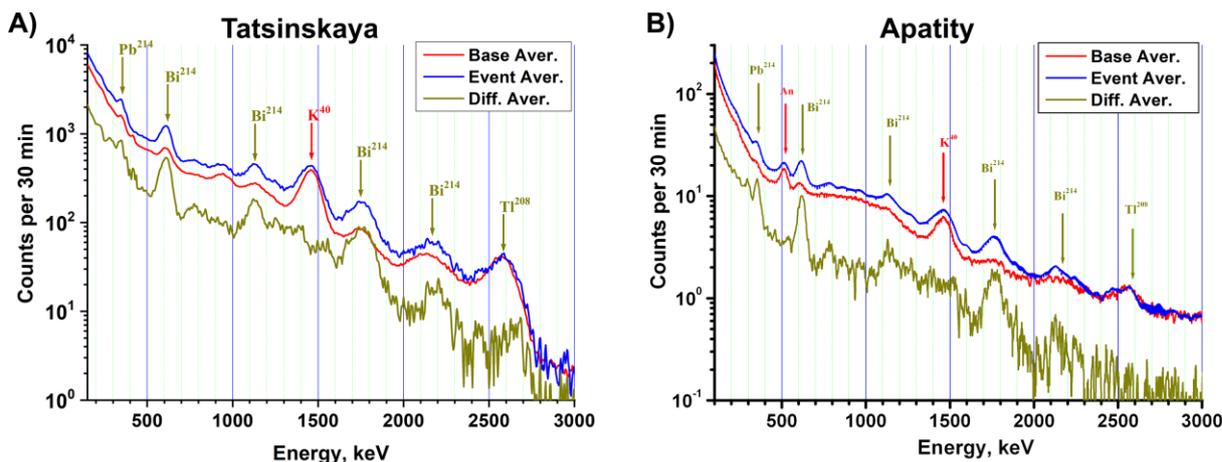


Рисунок 3. Средние спектры, вычисленные по нескольким событиям возрастных, зарегистрированных в Тацинской (А) и Апатитах (В).

Анализ средних спектров показывает следующее. Наиболее важное: поток СДП в Апатитах и Тацинской имеет один и тот же верхний энергетический предел ~ 2.5 МэВ. Т.е. возрастание потока гамма-излучения при осадках происходит на энергиях, меньше 2.5 МэВ, а при более высоких энергиях поток остается тем же, какой был до возрастания. При том, что амплитуда возрастания в Тацинской в полтора раза больше.

Поток квантов гамма-излучения, приходящий в кристалл детектора более чем на порядок больше в Тацинской. Это объясняется тем, что кристалл портативного спектрометра не экранировался от излучения почвы и окружающих предметов. Линия калия-40 на спектре возрастания и базовом спектре более интенсивная в Тацинской, чем на таких же спектрах в Апатитах. Объясняется тем, что портативный спектрометр был установлен в деревянном строении, а в древесине содержится этот радионуклид. В Апатитах в поле зрения спектрометра попадают только строения. Стоит отметить, что на разностных спектрах СДП и в Тацинской, и в Апатитах линия калия-40 отсутствует, что означает: в осадках калия-40 нет. Обращает на себя внимание, что на спектрах в Тацинской отсутствует аннигиляционная линия 511 кэВ, тогда как в Апатитах она отчетлива. Позитроны, аннигиляция которых дает линию 511 кэВ, возникают при распаде положительных мюонов [6], когда последние теряют энергию и замедляются. Эффективные потери энергии происходят в плотных и тяжелых веществах [7]. Спектрометр в Апатитах окружен свинцовой защитой, тогда как в Тацинской спектрометр не имел никакой защиты. Отсутствие аннигиляционной линии наблюдается и в [9], где аналогичный нашему спектрометр был установлен под легким навесом на открытой площадке.

Радионуклиды свинца-214, висмута-214, таллия-208 присутствуют в спектрах в Тацинской и Апатитах. Свинец-214 и висмут-214 принадлежат семейству урана-238, а таллий-208 принадлежит семейству тория-232 [8]. Их присутствие в спектрах возрастания и в базовых спектрах вполне объяснимо: это дочерние продукты распада природных долгоживущих радионуклидов, присутствующих в почве и различных породах, в окружающих строениях. Но почему они не исчезают на спектре СДП при вычитании, подобно линии калия-40? Наиболее вероятна следующая причина. Во время дождя происходит захват каплями частичек пыли, поднятой ветром и воздушными потоками с поверхности земли в атмосферу, следовательно, при дожде линии этих радионуклидов должны усиливаться. В этом случае эти линии не будут обнуляться.

В Апатитах за 2022 г. накоплена база данных по 68-ми событиям возрастных с записью спектров, в [1] представлено подробное исследование и анализ различных характеристик спектров, определение их зависимости от некоторых интегральных параметров. В них входили в том числе полная энергия, поступившая в кристалл, и парциальная (по отдельным линиям радионуклидов), средняя по спектру энергия и др. Исследование этих характеристик показывают, что вклад радионуклидов составляет 0.1 от общего эффекта. Таким образом, для Апатитов можно сделать вывод, что эффект возрастания гамма-излучения при осадках не вызван наличием радионуклидов в осадках. Для Тацинской число зафиксированных возрастных 2.5 МэВ позволяет предположить, что и для Тацинской вклад радионуклидов в возрастание будет незначительной величиной. Что означает: возрастания гамма-излучения при осадках в средних широтах, как и в полярных, обусловлено каким-то общим механизмом взаимодействия метеорологических процессов со вторичными космическими лучами.

4. Заключение

В лаборатории Космических лучей разработан и создан портативный дифференциальный спектрометр гамма-излучения в диапазоне 0.1-4 МэВ. С его помощью были проведены длительные измерения спектра гамма-излучения во время возрастаний потока излучения, связанных с осадками. Измерения проводились в средних широтах в летний период. Анализ спектров, полученных на аналогичном спектрометре в Апатитах и в средних широтах, показал, что спектр дополнительного потока, вызывающего возрастание гамма-излучения, имеет одинаковый верхний энергетический предел ~2.5 МэВ. Отдельные линии радионуклидов, присутствующие на спектрах, не являются определяющими и не могут обеспечить наблюдаемую амплитуду возрастания.

Литература

1. 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. DOI: 10.12737/szf-92202305
2. Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Луковникова А.А., Торопов А.А. Общие свойства возрастаний гамма-фона и их статистические характеристики // Изв. РАН. Серия физическая, 2019, Т. 83, № 5, С. 659. DOI: 10.1134/S0367676519050090
3. Balabin Yu., Gvozdevsky B., Germanenko A., Mikhalko E., Maurchev E., Shchur L. Common features of gamma-radiation increase at different stations from Arctic to mid-latitudes // E3S Web of Conferences, 2018, V. 62, 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/20186201003
4. 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. DOI: 10.7868/S0016794014020023
5. <https://rp5.ru/>
6. Дорман Л.И. *Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей*, М.: Наука, 1975, 402 С.
7. Мурзин В.С. *Введение в физику космических лучей*. Москва: Изд-во МГУ, 1988.
8. Григорьев И.С., Мелихов Е.З. *Физические величины. Справочник*. Москва: Энергоатомиздат, 1991.
9. 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. DOI: 10.14407/jrpr.2017.42.3.158