

*На правах рукописи*

**Добрынина Екатерина Анатольевна**

**Исследование вариаций гамма-фона  
с помощью сцинтилляционного  
детектора LVD**

1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц,  
физика высоких энергий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

**Научный руководитель:**

*Агафонова Наталья Юрьевна*, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики, лаборатория электронных методов детектирования нейтрино, заведующий лабораторией, старший научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

*Дербин Александр Владимирович*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Отделение нейтронных исследований, отдел полупроводниковых ядерных детекторов, заведующий отделом.

*Рябов Владимир Алексеевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук, заместитель директора по научной работе.

**Ведущая организация:**

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна.

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте по адресу: <http://www.inr.ru>.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.163.01,  
кандидат физ.-мат. наук

*Демидов Сергей Владимирович*

## **Общая характеристика работы**

Настоящее исследование посвящено изучению с помощью детектора LVD вариаций гамма-квантов от естественной радиоактивности в подземном зале Лаборатории Гран Сассо (LNGS) в Италии и определению источников их происхождения. Сцинтилляционный детектор большого объема LVD непрерывно работает по программе регистрации нейтрино от вспышек сверхновых в нашей галактике. Естественная радиоактивность и атмосферные мюоны являются фоном детектора. В работе использовалась накопленная статистика с 1992 по 2023 годы. Анализ большого набора данных по фону от естественной радиоактивности позволяет получить результаты с большой точностью.

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности**

Научная значимость и актуальность продиктованы новыми вызовами, связанными с изучением радиоактивного фона, который является трудно устранимым при поиске редких событий, таких как темная материя и безнейтринный бета-распад. В Лаборатории Гран Сассо в Италии разрабатываются эксперименты NEWSdm, Legend и учет фона до сих пор является сложной экспериментальной задачей.

Во всем мире ведутся исследования по изучению поведения радоновых полей. В ряде работ были получены указания на связь эманации радона с готовящимися и происходящими сейсмическими событиями и атмосферными явлениями. Низкая статистическая обеспеченность и противоречивость имеющихся на сегодня результатов не позволяют установить закономерности изучаемых явлений и использовать радоновые данные для достоверного прогноза землетрясений. Актуальность изучения выбросов радона по непрерывному мониторингу скорости счета гамма-квантов, во время землетрясений может создать предпосылки для разработки определения предвестников сейсмических явлений.

## **Цели и задачи работы**

Данная работа направлена на изучение процесса выхода радона из грунта под землей, исследование характеристик его вариаций под действием различных факторов: атмосферных, геофизических и техногенных.

К конкретным задачам работы относятся:

1. Определение параметров вариаций (годовых, недельных, месячных, суточных, аномальных) скорости счета гамма-квантов от цепочек распада уранового и ториевого рядов с помощью подземного детектора LVD.

2. Определение источников изменения концентрации радона под землей (разделение геофизических и техногенных факторов), изучение кратковременных радоновых выбросов.

## **Научная новизна и практическая ценность работы**

Научная новизна работы состоит в использовании большого сцинтилляционного детектора LVD в низкофоновой подземной лаборатории, информация, с которого позволяет определять эманацию радона из грунта с большой точностью. Месторасположение детектора — горный массив Гран Сассо — сейсмоактивный район Италии. В районе Гран Сассо происходили крупные землетрясения (апрель 2009 года, октябрь 2016 года). Регистрируя гамма-кванты с энергией выше 0.5 МэВ, установка LVD чувствует изменения концентрации радона в пределах 5% на уровне 3 сигма, что более чем на порядок превышает чувствительность современных приборов, измеряющих величину концентрации радона по альфа-активности ядер радоновой группы.

Разработан алгоритм автоматического отбора сцинтилляционных счетчиков для непрерывного мониторинга скорости счета гамма-квантов от дочерних продуктов распада радона.

Уникальность метода и большая статистика позволяют разработать новый метод определения изменения эманации радона, найти периодические вариации концентрации радона и разделить источники его вариаций.

## **Методология и методы исследования**

Разработанные методы предоставляют ряд решений в обработке и анализе временных рядов данных сцинтилляционного детектора LVD. Применен метод наложения эпох, представляющий собой статистический инструмент, используемый для обнаружения периодичности во временной последовательности. Использовались метод быстрого преобразования Фурье и корреляционные функции для определения статистической связи между значениями, изменяющимися во времени последовательности экспериментальных данных.

## **Личный вклад автора**

На основе особенностей детектора LVD разработан и применен метод выделения и построения временных рядов скорости счета гамма-квантов от естественной радиоактивности грунта и материалов установки. Применен метод наложения эпох для нахождения вариаций скорости счета гамма-квантов на LVD. Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Разработан метод предварительной подготовки и представления данных эксперимента LVD по низкоэнергетическому ( $E > 0.5$  МэВ) каналу регистрации. Получены данные, усредненной за час скорости счета гамма-квантов на LVD с относительной ошибкой  $\sim 0.3\%$ .
2. Создан пакет программ для выделения и построения временных рядов скорости счета гамма-квантов, регистрируемых LVD, включающий автоматический отбор счетчиков и графическое представление результатов. Определены критерии для автоматического отбора счетчиков LVD. Выполнена обработка данных с 1992 по 2023 гг.
3. Предложен метод нахождения соотношения между увеличением скорости счета гамма-квантов на установке LVD и повышением концентрации радона в подземном зале. При концен-

трации радона в подземном помещении равной  $20 \text{ Бк/м}^3$  часть постоянного фона на установке LVD, обусловленная радоном составляет  $6.2 \pm 0.5\%$ .

4. Получены суточные и недельные вариации концентрации радона в подземном экспериментальном зале установки LVD, связанные с режимом работы вентиляции и коррелирующие с рабочим временем сотрудников лаборатории Гран Сассо.
5. Найдены годовые (сезонные) вариации скорости счета гамма-квантов на LVD. За период с 2004 по 2021 годы амплитуда вариаций составила  $\delta_y = (3.0 \pm 1.1)\%$ , фаза  $\varphi_y = (7.5 \pm 0.5)$  мес., которая соответствует середине августа.
6. Получены характеристики лунно-месячных вариаций скорости счета гамма-квантов на LVD с периодом 29.5 суток. Максимум амплитуды вариаций  $\delta_m = (0.8 \pm 0.15)\%$  приходится на 3–5 день после полнолуния.
7. Не найдено прямой связи между изменением величины атмосферного давления и изменением скорости счета гамма-квантов на LVD (на масштабах 1 час — 20 суток). Во время резких понижений давления не обнаружен задержанный пампинг-эффект для гамма-квантов (в вентилируемом помещении на высоте  $\sim 1000$  м над уровнем моря при давлении 680 мм рт. ст.).

### **Степень достоверности**

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью применяемых методов, допускающих их воспроизводимость; сравнением различных методов анализа экспериментальных данных установки и их высокой статистической обеспеченностью. Полученные выводы находятся в соответствии с результатами моделирования. Достоверность подтверждается публикациями результатов исследований в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные системы цитирования Web of Science и Scopus, и в перечень журналов ВАК. Положения и выводы, сформулированные в диссертации, получили квалифицированную апробацию на научных конференциях, а также научных семинарах.

## Апробация работы

Результаты диссертации были представлены в виде докладов на конференциях и симпозиумах:

1. 38 Всероссийская конференция по космическим лучам 2024. «Сравнительный анализ влияния техногенных и сейсмических факторов на скорость счета фоновых гамма-квантов в подземных экспериментах LSD и LVD», (устный доклад, секция ГЕО), 01–05 июля 2024 г., <https://events.sinp.msu.ru/event/12/>
2. LIX Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. «Влияние давления в экспериментальном зале на скорость счета гамма-квантов в детекторе LVD, как фона при регистрации редких событий», (устный доклад). РУДН 22–26 мая 2023 г. Москва.
3. LVII Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. «Связь потоков гамма-квантов под землей с сейсмоактивностью» пленарный доклад. РУДН 23–27 мая 2022 г. Москва.
4. 37 Всероссийская конференция по космическим лучам (ВККЛ 2022). «Влияние давления и вентиляции в экспериментальном зале на скорость счета фоновых событий в детекторе LVD», 27 июня–2 июля 2022 г., <http://rcrc2022.sinp.msu.ru/>
5. 36 Всероссийская конференция по космическим лучам (ВККЛ 2020) «Отклик детектора LVD на землетрясения в центральной Италии», постер, 28.09–2.10.2020 г., НИИЯФ МГУ.
6. 1137-й семинар «Нейтринная и ядерная астрофизика» им. Г.Т.Зацепина «Изучение вариаций концентрации радона в подземной лаборатории Гран Сассо с помощью детектора LVD» (устный доклад), 10 февраля 2017 г. ФИАН, Москва.
7. 35 Всероссийская конференция по космическим лучам (ВККЛ 2016) Е.А. «Изучение низко-энергического фона в подземной лаборатории Гран Сассо с помощью детектора LVD», постерный доклад, 15–19 августа, Дубна, Россия.

## **Публикации**

Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 13 [A2–A13, A15] из которых изданы в научных журналах, рекомендованных ВАК, индексируемых Web of Science и/или Scopus.

## **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы. Работа изложена на 112 страницах машинописного текста и включает 55 рисунков и 11 таблиц.

## **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность детального исследования вариаций низкоэнергетического фона под землей. Описаны основные источники фона под землей и возможности их учета. Одной из составляющих переменного фона в атмосфере подземных помещений является радиоактивный газ радон. Концентрация радона величина не постоянная в силу подвижности и хорошей растворимости в воде этого газа, что затрудняет проведение точных измерений. Изменения концентрации радона в подземных помещениях могут быть вызваны многими факторами, такими как устройство и режим работы вентиляции в помещении, вибрация грунта (прохождение машин по транспортному туннелю, работа техники и т.д.), изменение насыщения водой скального грунта (при таянии снегов, обильных осадках), приливные силы, связанные с лунным циклом, сейсмическая активность, деформации земной коры, возникновение напряжений в грунте. Приводятся примеры отклика установки LVD на сильные землетрясения в Италии.

Во введении также сформулирована общая цель и конкретные задачи диссертационной работы, а также описываются научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлены выносимые на защиту основные полученные результаты, обосновывается степень их достоверности и приводятся сведения о публикациях и об апробации данной работы.



**В первой главе** приведено описание Детектора большого объема LVD, созданного для поиска нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звездных ядер [1]. Одним из основных направлений работы по изучению фона на установке LVD является мониторинг вариаций темпа счета по низкому порогу, связанных с изменением концентрации радона вблизи установки.

LVD находится в подземном зале Национальной лаборатории Гран Сассо INFN в горном массиве Гран Сассо в Центральной Италии под толщей скальной породы около одного километра и примерно на такой же высоте над уровнем моря. Горный массив Гран Сассо состоит из старых осадочных пород, содержащих в основном  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$  со средней плотностью  $\rho \sim 2.6 \text{ г/см}^3$  [2]. Грунт массива Гран Сассо имеет низкую радиоактивность, что очень важно для современных низкофоновых подземных экспериментов. Содержание изотопов урана, тория и калия в грунте Гран Сассо, измеренное в 1985 году Э.Белотти, составляет меньше 0.643 ppm, меньше 0.123 ppm и меньше 0.019 ppm, соответственно [3]. Экспериментальные подземные залы лаборатории располагаются в 50–100 метрах от двух параллельных транспортных туннелей (около 10 км каждый), соединяющих центральную часть Италии с Адриатическим побережьем.

Установка LVD содержит 1000 тонн жидкостного сцинтиллятора и 1000 тонн железа. Она имеет модульную структуру. Сцинтиллятор на основе уайт-спирита заполняет 840 счётчиков из нержавеющей стали объёмом  $1.5 \text{ м}^3$  каждый [1]. На верхней грани каждого счетчика установлены три фотоумножителя (ФЭУ-49Б или ФЭУ-125), включенные на совпадение. Все счетчики разделены на три башни по 280 штук каждая (рис. 1).

Информация с каждого счетчика считывается независимо. Импульсы с каждого ФЭУ усиливаются и дискриминируются по двум порогам: верхнему (HET – High Energy Threshold) и нижнему (LET – Low Energy Threshold) [4]. Такая двойная пороговая система была разработана с целью регистрации нейтринного излучения от коллапсов звезд и детектирования обеих частиц в реакции обратного бета-распада на водородосодержащем сцинтилляторе:  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ,  $n + p \rightarrow d + \gamma$ . Параллельно, для непрерывного наблюдения за фоном

низкоэнергетических импульсов, существует система регистрации, не зависящая от прихода триггерных частиц высокой энергии. Она открывает порог LET каждые 10 минут на 10 секунд и записывает количество импульсов, зарегистрированных в каждом счетчике.

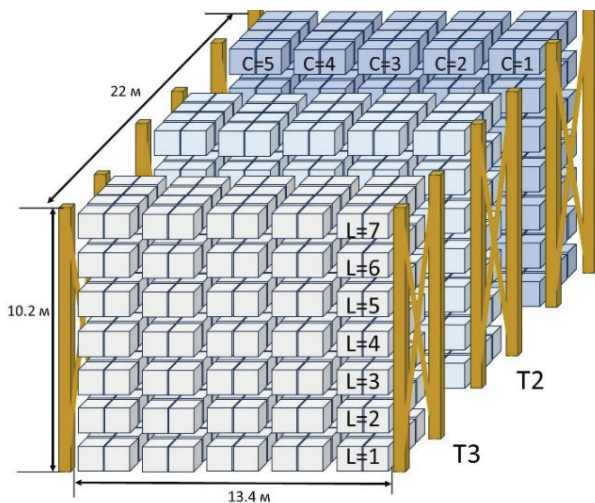
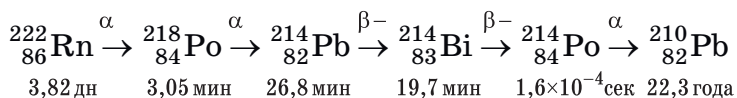


Рис. 1. Общий вид установки LVD и схема расположения поратанков

Зал эксперимента LVD (зал А) имеет объём 24000 м<sup>3</sup>, из них около 2000 м<sup>3</sup> занимает оборудование. Ввоз-вывоз оборудования производится через двое ворот. При закрытых воротах и блокированных затворах принудительной вентиляции зал практически герметичен в смысле его сообщения с атмосферой других помещений. В зале постоянно работает приточная вентиляция.

Основными источниками фона по низкому порогу на установке LVD являются естественная радиоактивность грунта, материалов установки и радон. Естественные радиоактивные элементы — уран, торий и калий — возникли в результате реакций синтеза ядер при образовании солнечной системы и содержатся в виде примесей в горных породах. Радон-222 — это радиоактивный газ без запаха, цвета и вкуса. Он образуется в процессе природного радиоактивного распада урана-238 и имеет длительный период полураспада (3.82 дня), поэтому может накапливаться в подземных помещениях в значительных количествах. Средняя концентрация радона в зале эксперимента LVD невысокая и составляет порядка 26 Бк/м<sup>3</sup>, благодаря хорошей изоляции помещения от скалы и постоянной работе принудительной вентиляции.

Система регистрации установки LVD содержит низкоэнергетичный канал, порог срабатывания которого 0.5 МэВ (для внутренних, защищенных от радиоактивности породы, счетчиков), поэтому установка способна фиксировать весь диапазон гамма-квантов от дочерних ядер радона. Наиболее вероятна следующая цепочка радиоактивных распадов:



Основной источник гамма-квантов — ядро  ${}^{214}_{83}\text{Bi}$ . Ядро образуется в возбужденном состоянии и приходит в основное состояние, испуская гамма-кванты. В среднем на 100 ядер висмута образуется 108 гамма-квантов. Энергетический спектр гамма-излучения охватывает диапазон от 0.6 до 2.5 МэВ. Ввиду невысоких энергий, гамма-кванты проникают в счётчик, главным образом, через верхнюю грань

счётчика, толщина металла которой 4 мм. Боковые и нижняя грани счётчика экранированы дополнительными 20 мм металла. Полная эффективная регистрирующая поверхность внутренних счетчиков трех башен суммарно составляет около 360 м<sup>2</sup>.

Модульная структура LVD позволяет проводить регламентные и ремонтные работы счетчиков установки не прерывая набор данных. Счетчики имеют разные энергетические и временные характеристики. В результате анализа временного распределения по каждому счетчику определены критерии для автоматического отбора стабильно работающих счетчиков. Основным критерием отбора является скорость счета импульсов в диапазоне от 200 до 2000 отсчетов в течение 10-ти секундного интервала для внутренних счетчиков установки. При этом полностью исключаются из рассмотрения все наружные счетчики, т.к. для них слишком велик фон окружающей породы.

Разработан метод предварительной подготовки и представления экспериментальных данных LVD как в числовом, так и в графическом виде. Для увеличения статистической значимости и удобства представления, данные усредняются по часу и записываются в файл, содержащий дату, время и скорость счета в герцах на один счетчик отдельно по каждой башне. В результате данные установки представляются в виде скорости счета фоновых гамма-квантов в секунду, нормированного на один счетчик (здесь и далее —  $C_{LVD}$ , 1/сек). На рисунке 2 показан пример графического представления экспериментальных данных на примере 2022 года — скорость счета гамма-квантов на установке LVD за две недели по каждой из трех башен.

Средняя скорость гамма-квантов для внутренних счетчиков первой башни установки составляет около 45 импульсов/(сек×счетчик), около 50 импульсов/(сек×счетчик) — для второй и 70 — для третьей. Выполнена обработка данных с 1992 по 2023 гг.

Быстродействие и высокая статистическая обеспеченность метода позволяют непрерывно следить за изменениями концентрации радона в экспериментальном зале, а система сбора информации — компьютеризировать обработку больших массивов данных.

## LVD 2022

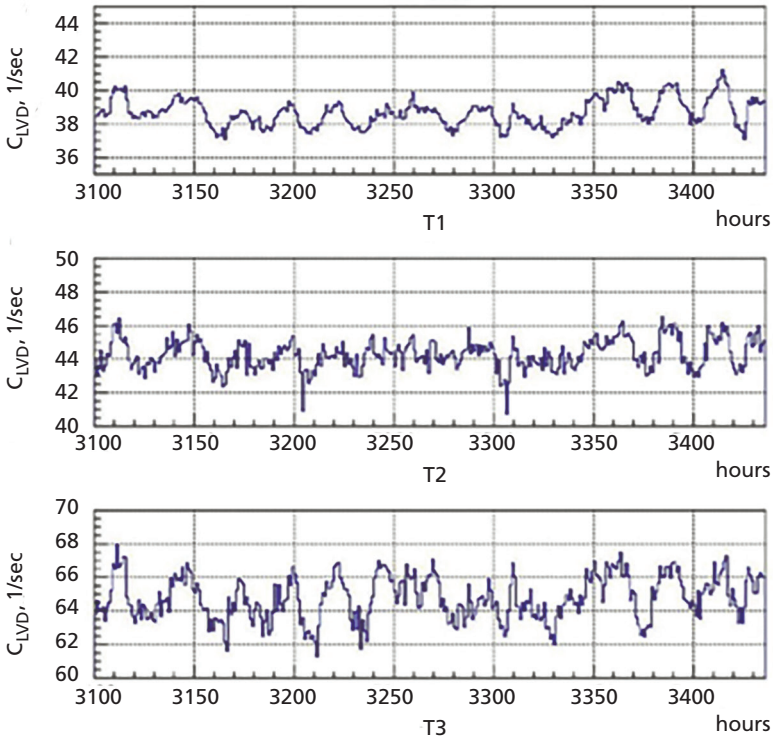


Рис. 2. Пример графического представления данных на примере 2022 года: скорость счета гамма-квантов на установке LVD за две недели по каждой из трех башен. По оси абсцисс — часы с начала года

Результаты этой главы опубликованы в работах: [A1], [A4], [A5], [A6], [A9], [A12].

**Во второй главе** показана связь измеряемой скорости счета гамма-квантов на LVD с концентрацией радона под землей. В подземном зале, между башнями установки LVD, установлен радиометр радона (радонометр), который проводит точечные замеры концентрации радона по альфа-активности дочерних ядер радона.

Подтверждением того, что резкое увеличение скорости счета гамма-квантов на LVD связано с инъекцией радона в атмосферу

зала, является явная корреляция временных рядов данных LVD и радонметра. Максимум корреляции получается при задержке данных радонметра примерно на час относительно данных LVD [5]. Эту задержку можно объяснить, посмотрев на цепочку распадов радона: радонметр регистрирует альфа-частицы от распадов радона и полония, а LVD — гамма-кванты от висмута.

Полный фоновый темп счёта гамма-квантов на установке LVD можно разделить на две составляющие: переменную, связанную с изменением концентрации радона в подземном помещении, и постоянную, связанную с собственной радиоактивностью материалов установки и окружающей среды (в основном, скальной породы). В постоянной составляющей фона также присутствует доля от постоянной, равновесной концентрации радона. В этой главе описан предложенный метод нахождения соотношения между увеличением скорости счёта гамма-квантов на установке LVD и повышением концентрации радона в подземном зале. Получены вычисленные по экспериментальным данным усредненные соотношения. Увеличение на 1 Hz скорости счёта на первой башне LVD соответствует повышению концентрации радона в помещении на  $1 \text{ Hz} = 7.9 \pm 0.5 \text{ Бк/м}^3$ . При концентрации радона в помещении равной  $20 \text{ Бк/м}^3$  на установке LVD будет зарегистрировано в среднем  $2.6 \pm 0.2$  отсчета, обусловленных радоном, что составляет  $6.2 \pm 0.5\%$  от общей скорости счёта гамма-квантов на LVD. При концентрации радона в помещении равной  $50 \text{ Бк/м}^3$  на установке LVD будет зарегистрировано в среднем  $6.5 \pm 0.7$  отсчета, обусловленных радоном, что составляет порядка  $14 \pm 2\%$  от общей скорости счёта гамма-квантов на LVD. Приведены также оценочные вычисления количества отсчетов в детекторе при известной концентрации радона в помещении: при концентрации радона в помещении равной  $20 \text{ Бк/м}^3$  на установке LVD должно быть зарегистрировано примерно 2.8 импульсов в секунду на счетчик, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Переменная составляющая фонового темпа счёта гамма-квантов на установке LVD имеет форму пика. Форма пика обусловлена инъекцией радона в атмосферу зала и его выдувом из подземного зала приточной вентиляцией. Определены временные параметры

среднего пика: время нарастания (фронт) от 3 до 10 часов и экспоненциальный спад длительностью до ~14 часов с показателем экспоненты ~3 часа. Спад концентрации радона в зале согласуется с расчетным законом, где  $\tau$  вентиляции составляет порядка 3 часов [6]. По окончании пика величина концентрации выходит на равновесное значение (между эманацией из скалы и воды, с одной стороны, и вентиляцией — с другой).

Можно выделить два периода работы установки, которые связаны с разной работой системы вентиляции в экспериментальном зале установки LVD. Период I [7], в который вентиляция отличалась от «обычной»: с 2004 до 2008 год. Период II со стандартной вентиляцией: с 1992 по 2004 год и с 2009 года по настоящее время.

Получены суточные и недельные вариации концентрации радона в подземном экспериментальном зале установки LVD, связанные с режимом работы вентиляции и коррелирующие с рабочим временем сотрудников лаборатории Гран Сассо. В анализе периодических вариаций временных рядов скорости счета гамма-квантов в LVD  $C_{LVD}(t)$  были использованы экспериментальные данные за 18 лет работы детектора (2004–2023 гг.). На рисунке 3 приведены вариации  $C_{LVD}(t)$  в течение одной недели (с понедельника по воскресенье). Графики получены методом наложения эпох: просуммированы соответствующие день недели и час в течение года и усреднены. Во все годы, кроме 2020, хорошо видны суточные вариации концентрации радона в экспериментальном зале в течение рабочей недели.

На поведении суточных и недельных вариаций  $C_{LVD}(t)$  можно увидеть отличия, обусловленные разной работой системы вентиляции. В период I (рис. 3а — 2005 год) в ночные часы концентрация радона растет, в течении рабочего дня падает, вечером опять начинает расти; в выходные дни остается на высоком «ночном» уровне. В период II (рис. 3б и 3в — 2009 и 2013 гг.) на гистограммах видны дневные увеличения концентрации радона и падение к ночи; в выходные дни низкая концентрация на уровне «ночных» значений. Во время ограничений, связанных с пандемией Ковид-19, концентрация радона не имела выраженных суточных вариаций оставалась на «ночном» уровне (рис. 3г — 2020 год). Помимо этого, имеется часовой сдвиг меж-



ду распределениями летних и зимних периодов в данных за сутки, связанный с разницей летнего и зимнего времени (часы установки всегда показывают “зимнее” время, а начало рабочего дня смещается).

Поведение суточного хода в 2009 году характерно для всего периода II и объясняется корреляциями с человеческой деятельностью в рабочее время: открыванием и закрыванием ворот в зал эксперимента. Благодаря хорошей изоляции помещения и действию точной вентиляции, при закрытых воротах концентрация радона

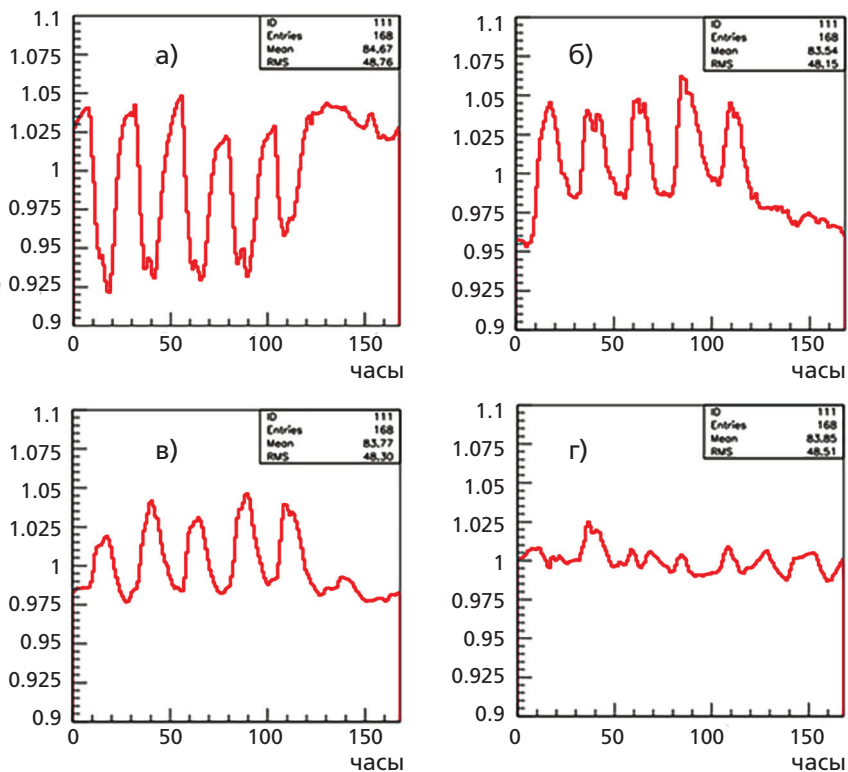


Рис. 3. Недельные вариации  $C_{LVD}$  за 2005(а), 2009(б), 2013(в) и 2020(г) гг., полученные методом наложения эпох (эпоха — 1 неделя = 168 часов). По оси абсцисс отложены часы с начала недели

в зале достаточно низкая. В прилегающих коридорах она больше в несколько раз. Ночью при закрытых воротах в зале эксперимента



устанавливается равновесие между постоянным выходом радона из скалы и работающей приточной вентиляцией. Днем в рабочее время открываются ворота в зал, что приводит к увеличению концентрации радона в зале LVD, т. к. туда начинает поступать воздух из соседних помещений с повышенной концентрацией радона.

Используя разработанный алгоритм построения временных рядов скорости счета гамма-квантов, проанализированы данные установки LSD (Liquid Scintillation Detector) (Монблан, 1985–1999 гг.) [8]. Являясь одинаковыми по структуре и методу регистрации, установки отличаются фоновыми условиями и количеством модулей – счетчиков, из которых они состоят: LSD содержит 72 счетчика, LVD – 280 (на 1997 год). За 1997 год были получены суточные и недельные вариации скорости счета для установок LVD и LSD. Сравнительный анализ данных двух установок подтверждает, что суточные и недельные вариации концентрации радона в подземных помещениях имеют техногенное происхождение и в значительной мере обусловлены устройством системы вентиляции в помещении.

Результаты главы опубликованы в работах: [A1], [A3], [A4], [A7], [A10].

**В третьей главе** обсуждается связь скорости счета гамма-квантов на LVD с атмосферным давлением и параметрами температуры, влажности и давления в подземном экспериментальном зале. Измерения температуры, влажности и давления в низкофоновых помещениях, предназначенных для поиска редких событий, являются неотъемлемой частью изучения фоновых условий экспериментов. В 2019–2020 годах в подземном зале эксперимента LVD было проведено несколько серий измерений с помощью термогигрометра ИВТМ-7 М 6-Д [9] для изучения климатических условий в подземном зале установки и их связи со скоростью счета гамма-квантов в LVD. Средняя температура в центре детектора  $\langle T \rangle = (20.0 \pm 0.1 \text{ сис})^\circ\text{C}$ . Температура воздуха зависит от высоты, на которой проводились измерения и слабо от сезона (зима – лето). Средняя влажность в центре детектора  $\langle H \rangle = (39.5 \pm 0.2 \text{ сис})\%$ . Влажность в зале имеет достаточно большой разброс. В зале детектора среднее давление за месяц

практически постоянно и равно  $\langle P \rangle = (680 \pm 1 \text{ сис})$  мм рт. ст. В главе подробно описаны проведенные измерения и результаты.

Для выявления связи между изменением давления в подземном зале Лаборатории и скоростью счета гамма-квантов на LVD были рассчитаны корреляционные функции. Использовались данные по давлению, измеренного термогигрометром для трех периодов набора данных (во время непрерывной статистики, когда прибор не переносился в разные места установки). В результате анализа не было выявлено значимой корреляции при временном сдвиге в диапазоне от  $-250$  до  $250$  часов.

Сравнение величин атмосферного давления на поверхности и давления в подземном зале эксперимента LVD, измеренного с помощью термогигрометра, показало высокую корреляцию ( $r = 0.95$ ). Разница давлений в зале и на поверхности имеет небольшую сезонную вариацию (минимум — в конце июля, максимум — в начале февраля) и составляет 2%. Учитывая хорошую корреляцию между атмосферным давлением и давлением в экспериментальном зале, для долгосрочного анализа зависимости скорости счета гамма-квантов LVD от давления можно использовать базы данных по атмосферному давлению (в частности базу данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5). ERA5 [10] — это реанализ пятого поколения от Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) глобального климата и погоды за последние 4–7 десятилетий. База данных ERA5 содержит в себе ежечасные оценки большого количества параметров атмосферы. Используя высокую корреляцию между атмосферным давлением и давлением в экспериментальном зале, проведен долгосрочный корреляционный анализ данных LVD и атмосферного давления из базы данных ERA5.

Влияние атмосферного давления на выход подземных газов и, главным образом, радона изучается уже давно. В работе [11] впервые был обнаружен “задержанный барометрический эффект” для нейтронов, рождающихся в результате радиоактивного распада радона. В соответствии с положением экстремума корреляционной функции, вариации потока нейтронов отстают от вариаций атмосферного давления примерно на 2 суток. Позже был обнаружен ана-

логичный эффект для гамма-фотонов [12], время задержки изменения числа гамма-квантов составило примерно 1 сутки. В работе [13] методом корреляционного анализа обнаружен задержанный пампинг-эффект для пар переменных “давление-радон” и “давление-ионы” в закрытом помещении на глубине 10 метров. Показано, что баланс темпа накопления радона, времени его радиоактивного распада и характерного времени вариаций давления приводит к величине эффективной задержки в 2 суток между вариациями атмосферного давления и концентрацией радона. Барометрический эффект обнаружен при среднем давлении около 750 мм рт. ст.

Был проведен анализ данных установки LVD с целью обнаружения задержанного пампинг-эффекта для гамма-квантов в подземном зале лаборатории LNGS на глубине 3600 м в. э. Давление в помещении детектора составляет в среднем всего 680 мм рт. ст., т.к. установка расположена на высоте примерно 1000 м над уровнем моря. Для поиска барометрического пампинг-эффекта на статистике 2004–2022 гг. находились резкие понижения атмосферного давления. Понижение считалось резким, если в течение 72 часов давление падало на 15 мм рт. ст. и более. С 2004 по 2022 годы найдено 43 таких понижений, а падений более чем на 20 мм рт. ст. за 72 часа — 11. Детальное изучение выделенных отрезков данных показало, что поведение временного ряда скорости счета гамма-квантов на LVD во время резкого понижения давления никак не отличается от поведения в любой другой период набора данных. На рисунке 4 показан пример одного из отобранных резких понижений давления. Приведены временные ряды изменения атмосферного давления и скорости счета гамма-квантов на установке LVD за 20 дней. Корреляционные функции в течение 3 суток до и после резкого падения давления тоже показали очень слабую корреляцию. Можно сделать вывод об отсутствии наблюдения барометрического пампинг-эффекта в экспериментальном зале LVD. На сегодня трудно сказать, связано ли это с системой вентиляции в помещении или с уровнем атмосферного давления (среднее давление на поверхности ниже обычного, где наблюдался задержанный пампинг-эффект). Вероятно, на изменение концентрации радона больше влияет открывание ворот персо-

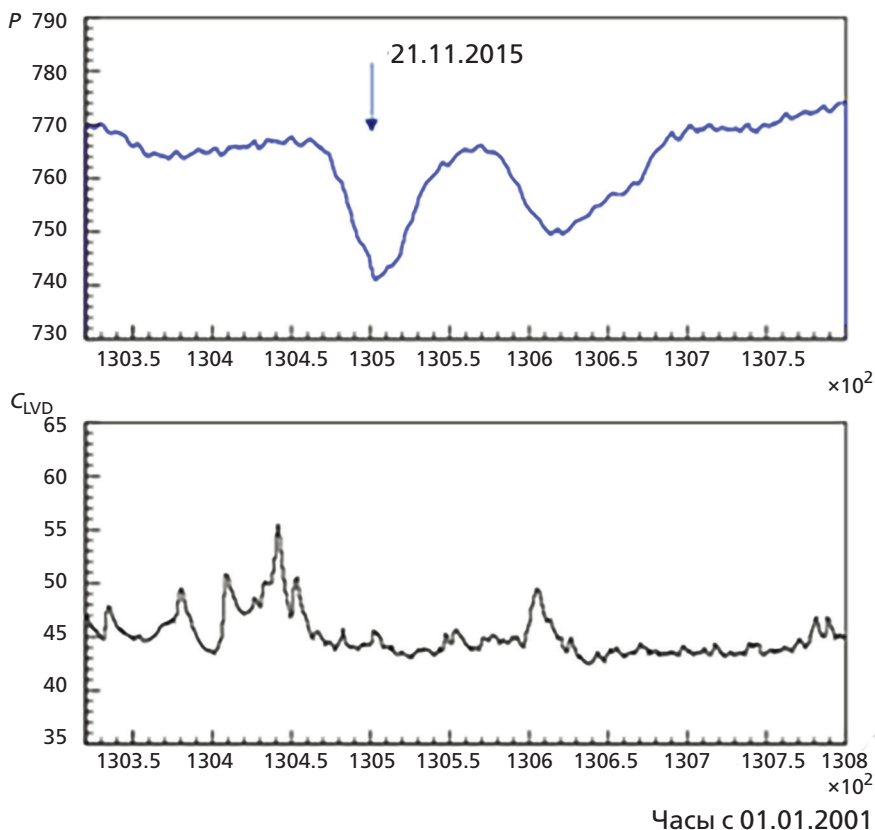


Рис. 4. Пример одного из отображенных резких понижений давления: синяя линия — атмосферное давление в мм рт. ст., черная гистограмма — скорость счета гамма-квантов на LVD в 1/сек.

налом лаборатории, во время которых порция воздуха из коридора с повышенным содержанием радона создает суточные вариации скорости счета гамма-квантов с максимумом в середине рабочего дня.

Статистика детектора LVD позволяет провести подробный анализ связи атмосферного давления и скорости счета гамма-квантов от естественной радиоактивности под землей, вариации которых связаны с выходом радона из горной породы Гран Сассо. За 18 лет статистики во временных рядах данных скорости счета гамма-квантов на LVD и атмосферного давления было выделено 30 линейных трендов со средней длительностью около 4 мес. Они имеют сильную

антикорреляцию и носят несезонный характер. Коэффициент корреляции Пирсона между значениями наклонов равен  $-0.79$ . В главе приведены характеристики выделенных трендов.

Результаты главы опубликованы в работах: [A4], [A5], [A7], [A8], [A13], [A14].

**Четвертая глава** посвящена геофизическим и гравитационным эффектам, которые модулируют скорость счета гамма-квантов под землей. Приведены результаты Фурье-анализа временных рядов скорости счета гамма-квантов на LVD.

С целью выделения долговременной составляющей вариаций концентрации радона в подземном помещении был проведен анализ данных с 2009 по 2021 годы (период II). Использовались данные скорости счета гамма-квантов LVD, нормированные на среднее в год, чтобы привести к «1» ( $N_y / \langle N_y \rangle$ ). Амплитуда модуляции колебаний скорости счёта  $\delta N_y / \langle N_y \rangle$  и фаза  $\varphi_y$  с достаточной точностью была установлена методом «наложения эпох»: при этом соответствующие данные за 12 лет наблюдений накладывались друг на друга и усреднялись (рис. 5). Эти результаты хорошо обеспечены статистически: измерения проводятся каждые 10 минут, а затем усредняются по большому объему данных. Каждый бин гистограммы рисунка 3 содержит порядка 109 отсчетов, что дает относительную ошибку порядка 0.003%.

Аппроксимируя временное распределение законом  $N_y(t) = 1 + [\delta N_y / \langle N_y \rangle] \times \cos(2\pi(t - \varphi_y) / T)$  с бином 1 месяц и принимая  $T=12$  месяцев, были получены значения величин модуляции  $\delta N_y / \langle N_y \rangle = (3.0 \pm 1.1)\%$  и фаза  $\varphi_y = (7.5 \pm 0.5)$  мес. Ошибка определения величины  $\delta N_y / \langle N_y \rangle$  связана с колебанием климатических условий год от года, количеством осадков, атмосферными и сейсмическими явлениями в регионе. Максимум выхода радона приходится на август. Радон переносится подземными водами, и его максимальная концентрация достигается во время максимального насыщения скалы водой.

Аппроксимируя временное распределение законом  $N_y(t) = 1 + [\delta N_y / \langle N_y \rangle] \times \cos(2\pi(t - \varphi_y) / T)$  с бином 1 месяц и принимая  $T=12$  месяцев, были получены значения величин модуляции  $\delta N_y / \langle N_y \rangle =$

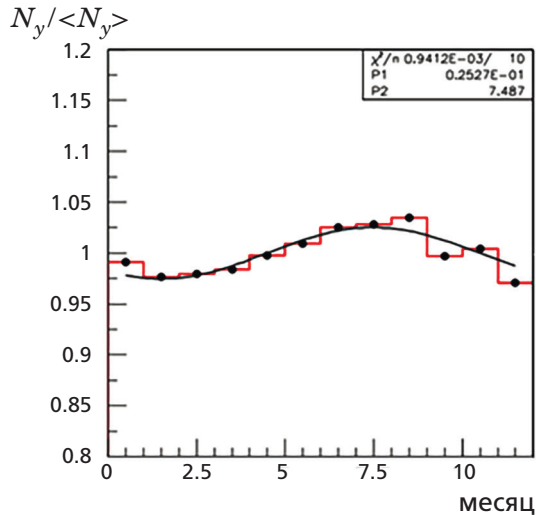


Рис. 5. Сезонные вариации скорости счета гамма-квантов на LVD, в относительных величинах  $N_y / \langle N_y \rangle$ , полученные методом наложения эпох. Кривая — аппроксимация гармонической функцией

( $3.0 \pm 1.1$ )% и фаза  $\varphi_y = (7.5 \pm 0.5)$  мес. Ошибка определения величины  $\delta N_y / \langle N_y \rangle$  связана с колебанием климатических условий год от года, количеством осадков, атмосферными и сейсмическими явлениями в регионе. Максимум выхода радона приходится на август. Радон переносится подземными водами, и его максимальная концентрация достигается во время максимального насыщения скалы водой.

В главе описаны два независимых способа выделения лунно-месячных вариаций скорости счета гамма-квантов методом наложения эпох. В I способе эпоха составляет 708 часов ( $708/24 = 29.5$  суток) и отсчитывается от начала выбранного для анализа интервала данных. Во II способе сначала выделяются лунные месяцы (синодического периода) и фиксируются известные даты полнолуний. Отсчитывая 14 суток вправо и влево по временной шкале от дней полнолуния, формируются данные для каждого лунного месяца. Таким образом, образуются временные ряды по 29 суток с полнолунием, приходящимся на 15-ые сутки лунного месяца. Статистика 2009–2019 годов была разделена на два периода: а) дневные часы с 08 утра по 20

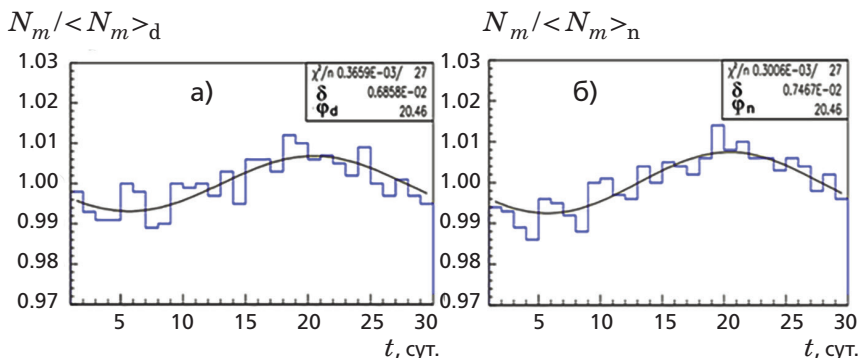


Рис. 6. Лунно-месячные вариации  $N_m / \langle N_m \rangle$  концентрации радона, приведенной на среднее за год: а) в дневное, б) в ночное время

часов и б) ночные часы с 23 часов по 06 утра. Данной процедурой изучалось влияние суточных вариаций темпа счета, обусловленных открыванием ворот в экспериментальный зал и работой сотрудников на экспериментах на выделение лунно-месячных вариаций. На рисунках 6а и 6б представлены лунно-месячные вариации с эпохой один лунный месяц. На 15-ый бин гистограммы всегда приходится полнолуние. Данные  $C_{LVD}$  нормированы на среднее значение в год. Метод наложения эпох дал одинаковый результат для дневного и ночного периода набора данных. Это означает, что активность людей в экспериментальном зале, которая создает техногенные пики (возмущения), не мешает наблюдать лунно-месячные вариации гамма-квантов, регистрируемые LVD.

Аппроксимация законом  $f(t) = 1 + [\delta N_m / \langle N_m \rangle] \times \cos(2\pi(t - \varphi_m)/T)$  (период  $T=29.5$  суток) распределений, полученных первым и вторым способом, дает одинаковый результат. Максимум амплитуды лунно-месячных вариации скорости счета гамма-квантов на LVD с периодом 29.5 суток составляет  $\delta_m = (0.8 \pm 0.15)\%$  и приходится на 3 – 5 день после полнолуния.

**В заключении** даны основные выводы диссертации и обозначены планы дальнейшей работы. Сформулированы основные результаты, полученные в работе по выделению вариаций гамма-квантов

от естественной радиоактивности в подземном зале эксперимента LVD и поиску причин их возникновения. В продолжение настоящей работы планируется детальное изучение обнаруженных трендов изменения скорости счета гамма-квантов на LVD и атмосферного давления на масштабах порядка 3–4 мес. Это исследование может помочь получить новую информацию о глубинных процессах и связях тектонических движений и метеорологических эффектов на Земле. Также будет продолжена работа по изучению связи изменения концентрации радона с сейсмическими явлениями и по выделению предвестников землетрясений.

### **Благодарности**

В заключение я хочу поблагодарить своего научного руководителя Наталью Юрьевну Агафонову за постоянную помощь в работе, ценные замечания и указания, всестороннюю поддержку и плодотворные обсуждения. Также хочу выразить свою признательность своему первому научному руководителю Мальгину Алексею Семёновичу, под руководством которого была начата эта работа и поблагодарить его за все, чему он меня научил за время совместной работы.

Я благодарна всему коллективу лаборатории ЭМДН за искренний интерес, готовность помочь и дружескую атмосферу. Я особенно признательна Валерию Федоровичу Якушеву за помощь в проведении фурье-анализа и за содержательные обсуждения научных вопросов. Я благодарю Ирину Ромельевну Шакирьянову за огромную помощь в работе с базой данных ERA5 и постоянный интерес к работе. Хочу поблагодарить итальянских коллег по коллаборации LVD за совместную экспериментальную работу, а также всех, кто создавал установку и поддерживает её непрерывную работу.

Я признательна коллегам Л.Б. Безрукову, Ю.В. Стенькину, С.В. Ингерман за полезные предложения, ценные замечания и советы.

Исследование частично выполнено при финансовой поддержке по гранту Российского научного фонда 23-22-00048, <https://rscf.ru/project/23-22-00048/>.



## Список публикаций по результатам диссертации

- A1. Изучение вариаций концентрации радона под землей с помощью установки LVD / *Н.Ю.Агафонова, В.А.Алексеев, Е.А.Добрынина* [и др.], Препринт 1071/2001. — М. : ИЯИ РАН, 2001.
- A2. Сезонные вариации потока нейтронов, генерируемых мюонами, и фона естественной радиоактивности в подземной Лаборатории Гран Сассо / *Н.Ю.Агафонова, В.В.Ашихмин, ..., Е.А. Добрынина* [и др.] и коллаборация LVD // Известия РАН. Сер. Физ. — 2017. — Т. 81, №4. — С. 551–554. DOI: 10.7868/S0367676517040032
- A3. Эксперимент LVD: 25 лет работы / *Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, Е.А. Добрынина* [и др.] // Ядерная Физика. — 2018. — Т. 81, №. — С. 85–94. DOI: 10.7868/S0044002718010038
- A4. Изучение вариаций низкоэнергетического фона с помощью подземного эксперимента LVD / *Н.Ю.Агафонова, В.В.Ашихмин, Е.А.Добрынина* [и др.] // Известия РАН Сер. Физ. — 2019. — Т. 83, № 5. — С. 673–675. DOI: 10.1134/S0367676519050041
- A5. Variations of Atmospheric Muons and Background Measured with Large Volume Detector // *N.Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina* [et al.] (on behalf of the LVD Collaboration) // Physics of Atomic Nuclei. — 2021. — V. 84, No. 6. — P. 1065–1069. DOI: 10.1134/S1063778821130019
- A6. Отклик детектора LVD на землетрясения в центральной Италии / *Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, Е.А. Добрынина* [и др.] и коллаборация LVD // Известия РАН. Сер. Физ. — 2021. — Т. 85, N 11. — С. 1661–1665. DOI: 10.31857/S036767652111003X
- A7 Analysis of Cosmogenic Neutron Characteristics and the Pulses Counting Rate Using ASD, LSD, and LVD Scintillation Detectors // *N.Yu. Agafonova, M. Aglietta, ..., E.A. Dobrynina* [et al.] // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2022. — V. 134, No. 4.— P. 449–458. DOI: 10.1134/S1063776122040124
- A8. Регистрация распадов радона с помощью нейтринного детектора LVD // *Н.Ю.Агафонова, Е.А.Добрынина, Н.А.Филимонова* [от имени коллаборации LVD] // ВМУ. Серия 3. ФИЗИ-

- КА. АСТРОНОМИЯ. — 2023. — Т. 78(1), — С. 2310202. DOI: 10.55959/MSU0579-9392.78.2310202
- A9. Влияние давления и вентиляции в экспериментальном зале на скорость счета фоновых событий детектора LVD / *Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, Е.А. Добрынина* [и др. от имени коллаборации LVD] // Известия РАН Сер. Физ. — 2023. — Т. 87, № 7. — С. 1045–1047. DOI: 10.31857/S0367676523701879
- A10. Long-term Analysis of the Energy Calibration of LVD Counters / *N.Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina* [et al. and LVD Collaboration] // Bull. of the Rus. Acad. of Sci. : Physics. — 2023. — V. 87, No. 7. — P. 1053–1055. DOI: 10.3103/S1062873823702404
- A11. Периодические вариации концентрации радона в подземной Лаборатории Гран Сассо, измеренные с помощью LVD / *Н.Ю. Агафонова, Е.А. Добрынина, И. Р. Шакирьянова, Н. А. Филимонова* // ЖЭТФ. — 2023. — Т. 164, вып. 3 (9). — С. 386–395. DOI: 10.31857/S0044451023090079
- A12. Lunar-Monthly Variances in the Background Gamma-Quanta Measured at the LVD / *N.Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina* [et al., on behalf of the LVD Collaboration] // Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — V. 86, No. 6. — P. 1014–1020. DOI: 10.1134/S1063778824010046
- A13. Частотно-временной анализ измерений радоновых выбросов в подземной лаборатории LNGS, измеренных детектором LVD / *В.Ф. Якушев, Н.Ю. Агафонова, ..., Е.А. Добрынина* [и др. и LVD Коллаборация] // ЖЭТФ. — 2024. — Т. 166, вып. 3(9). — С. 330–339. DOI: 10.31857/S0044451024090049
- A14. Корреляционный анализ концентрации радона, измеренного по данным LVD, и данных давления в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) / *Н.Ю. Агафонова, Е.А. Добрынина, Н.А. Филимонова, И.Р. Шакирьянова* // LIX Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники : материалы конференции. Москва, РУДН, 22–26 мая 2023 г. — М. : РУДН, 2023. — 343 с.: ил. (ISBN 978-5-209-12214-2) стр. 108–113.
- A15. Analysis of Correlations between the Counting Rate for Natural-

Radioactivity Gammas at the Large Volume Detector (LVD) and Atmospheric Pressure / *N.Yu.Agafonova, V.V.Ashikhmin, E.A.Dobrynina et al.* // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2024. — V.87, No.6.— P. 732–739. DOI: 10.1134/S1063778824700686

### Список литературы

1. The Most Powerful Scintillation Supernova Detector LVD / *M.Aglietta* [et al.] // *Il Nuovo Cimento A*. — 1992. — 105A. № 12.— С.1793–1804.
2. Analisi strutturale nei laboratori dell'INFN del Gran Sasso d'Italia / *P.G. Catalano, G.P. Cavinato, Salvini F., M.Tozzi* // *Mem. Soc. Geol. It.* — 1986. — Т. 35 (2). — С. 647–655.
3. LVD at Gran Sasso / *G.Bari* [et al.] // *Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. A*. — 1988. — Т. 264. — С. 5–17.
4. New Measurement of rock contaminations and neutron activity in the Gran Sasso tunnel. / *E.Belotti, M.Burashi, E.Fiorini and C.Liguori*. — Preprint — 1985. — INFN/TC-85/19. 14 Ottobre 1985.— URL: [https://www.lnf.infn.it/sis/preprint/getfilepdf.php?filename=INFN-TC\\_85-19.pdf](https://www.lnf.infn.it/sis/preprint/getfilepdf.php?filename=INFN-TC_85-19.pdf)
5. *Bruno G., Menghetti H.* Low energy background measurement (~0.8 MeV) with the LVD // *Journal of Physics: Conference Series*.— 2006. — Т.39. — С. 278. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/39/1/068>
6. *Добрынина, Е.А.* Исследование вариаций темпа счета больших подземных сцинтилляционных установок LVD и LSD выше порога 0.5 МэВ и детектирование радона под землей. Дипломная работа. МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, каф. космических лучей и физики космоса, 2001.
7. *Gianmarco Bruno.* Neutron Background studies for direct dark matter searches in the Gran Sasso Underground Laboratory // PhD Thesis Universita degli studi di L'Aquila` Facolta di scienze Matematiche, Fisiche e Naturali. — 2012, 118p.
8. The 90 ton Liquid Scintillation Detector in the Mont Blanc Laboratory / *G.Badino, G.F. Bologna, C.Castagnoli* [et al.] // *Il Nuovo Cimento*. — 1984. — Т. 7С. — С.573–583.

9. Руководство по эксплуатации и паспорт. URL:[https://www.eksis.ru/upload/manuals/ivtm-7\\_m-1...7.pdf/](https://www.eksis.ru/upload/manuals/ivtm-7_m-1...7.pdf) (дата обращения 10.01.2019).
10. Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды. URL:<https://cds.climate.copernicus.eu> (дата обращения 16.08.2023).
11. Подземная физика и эффект влияния барометрического давления на подземный фоновый поток тепловых нейтронов / *Ю.В.Стенькин, В.В.Алексеев, Д.М.Громушкин* [и др.] // ЖЭТФ. — 2017. — Т.151. № 5. — С. 845–849. — DOI: 10.7868/S0044451017050054. — URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_29214661\\_16024300.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_29214661_16024300.pdf)
12. Подземная физика и нелинейный задержанный барометрический эффект гамма-фона / *Ю.В. Стенькин, В.В. Алексеев, А.В.Игошин* [и др.] // ЖЭТФ. — 2020. — Т. 158. — С. 469. — DOI: 10.31857/S0044451020090059. — URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_43864994\\_18091103.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_43864994_18091103.pdf)
13. Study of the Delayed Pumping Effect in an Underground Laboratory by Correlation Analysis of Radon and Air Ion Concentrations / *L.B.Bezrukov, I.S.Karpikov, V.V.Kazalov* [at al.] // Geomagnetism and Aeronomy. — 2024. — Т. 64, No. 1. — С.102–111.

Научное издание

Добрынина Екатерина Анатольевна  
Исследование вариаций гамма-фона  
с помощью сцинтилляционного детектора LVD

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 15.11.2024

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,2 Зак. № 22553 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а