

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук
Агафонова Н. Ю.

Москва – 2024

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Описание детектора LVD и метод регистрации	17
1.1 Описание детектора LVD.....	17
1.2 Фон естественной радиоактивности в зале эксперимента, происхождение радона.....	23
1.3 Непрерывный канал регистрации низкоэнергетичных импульсов и отбор счетчиков.....	31
1.4 Обработка и представление данных.....	33
1.5 Выводы.....	36
Глава 2. Связь скорости счета гамма-квантов, регистрируемых в LVD с радоном	38
2.1 Зависимость скорости счета гамма-квантов на LVD от концентрации радона в экспериментальном зале.....	38
2.2 Количественное соотношение между скоростью счета гамма-квантов на LVD и показаниями радонметра.....	39
2.3 Форма “радонового” пика на LVD.....	43
2.4 Вентиляция в зале эксперимента LVD.....	47
2.5 Суточные и недельные вариации скорости счета гамма-квантов на LVD.....	48
2.6 Сравнение с LSD.....	53
2.7 Выводы.....	58
Глава 3. Связь скорости счета гамма-квантов LVD с изменением давления	61
3.1 Измерения температуры, влажности и давления в экспериментальном зале.....	61
3.2 Сравнение данных LVD и термогигрометра.....	69
3.3 Связь давления в подземном зале с атмосферным давлением.....	71
3.4 Барометрический эффект на LVD.....	75

3.5 Тренды временных рядов скорости счета гамма-квантов и атмосферного давления.....	78
3.6 Выводы.....	83
Глава 4. Сезонные (годовые) и лунно-месячные вариации.....	85
4.1 Фурье анализ временных рядов скорости счета гамма-квантов на LVD.....	85
4.2 Сезонные вариации.....	89
4.3 Лунно-месячные вариации.....	90
4.4 Выводы.....	96
Заключение.....	98
Список сокращений и обозначений.....	103
Список литературы.....	104

Введение

В последние годы все больше разрабатывается и масштабируется экспериментов для исследований в области физики нейтрино, поиска редких событий (распад протона, двойной безнейтринный β -распад), а также поиска слабых сигналов (WIMP, частиц, составляющих темную материю).

Детектор LVD, расположенный в Национальной Лаборатории Гран Сассо Института ядерной физики Италии (LNGS INFN), предназначен для поиска нейтрино от вспышек Сверхновых в нашей галактике [1]. Редкая частота вспышек предъявляет особые требования к фону эксперимента. Во-первых, размещение детектора под землей уменьшило фон от проникающего космического излучения. Подавление потока атмосферных мюонов на глубине LVD $H=3300$ м в. э. (метров водного эквивалента) составляет 6 порядков. Мюоны, достигающие LVD, имеют пороговую энергию около 1 ТэВ. Интенсивность мюонов, регистрируемых детектором $I_0=3.35 \pm 0.0005_{\text{стат}} \pm 0.03_{\text{сис}} \times 10^{-4} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [2]. Поток мюонов вверх очень низок, менее 100 мюонов в год [3]. Во-вторых, осадочные породы грунта Гран Сассо имеют низкую естественную радиоактивность. 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 [4]. Гамма-активность первичных изотопов, определенная по измерениям с помощью 3-х дюймового детектора NaI(Tl) [5], составляет в зале эксперимента LVD: 11.7 ± 3.9 Бк/кг для ^{238}U , 14.8 ± 2.8 Бк/кг для ^{232}Th и 62 ± 14 Бк/кг для ^{40}K .

Эксперименты, проводимые в LNGS [6], такие как DAMA/LIBRA, XENON, CRESST, Bogexino, предназначенные для поиска редких событий побуждают более детально исследовать вариации низкоэнергетического фона под землей. В счетных экспериментах чувствительность прямо пропорциональна скорости сигнала, но обратно пропорциональна только квадратному корню из фоновой скорости. Поскольку скорость сигнала в большинстве случаев ограничена по

техническим и экономическим причинам, то необходимо пойти по пути снижения фона.

Источники фона под землей можно разделить на следующие четыре составляющие:

- а) радиоактивность окружающих горных пород, включая нейтроны от естественного деления и (α, n) реакции;
- б) присутствие радиоактивных примесей в материале детекторов и их защиты;
- в) содержащийся в воздухе и воде газ радон ^{222}Rn и продукты его распада;
- г) мюоны космических лучей и их вторичные частицы.

Постоянные составляющие фона а) и б) можно оценить и определить на этапе создания экспериментов. Содержание радиоактивных элементов (рядов урана, тория и радиоактивного изотопа калия) оценены для разных пород грунта и могут быть измерены различными методами [7, 8].

Составляющая г) известна с достаточно большой точностью [9]. Недавно, получены вариации мюонов за 25 лет наблюдений и измерен поток мюонов с высокой точностью на глубине 3600 м в. э. [2]. Зависимость ядерных эффектов, вызываемых мюонами космических лучей от глубины грунта изучались в работах Г.Т. Зацепина и О.Г. Ряжской [10, 11] и продолжены их учениками Н.Ю. Агафоновой и А.С. Мальгиным [12, 13]. Несмотря на известный поток мюонов под землей, нейтроны, генерированные мюонами еще не до конца изучены. Измерения сезонных вариаций нейтронов от мюонов под землей получены, только в работах [14], с помощью детектора LVD. Детектирование нейтронов осуществлялась по регистрации гамма-квантов с энергиями от 0.5 до 12 МэВ от захватов нейтронов протонами и ядрами железа. Оценки потока нейтронов от мюонов, как фона под землей, были сделаны в [15], аналитическое выражение для потока нейтронов получено в [13]. Для защиты детекторов от мюонов под землей обычно используют вето-защиту, которая срабатывает только при попадании мюонов в детектор. Однако же, нейтроны, генерированные мюонами, которые прошли в грунте рядом с детектором, могут свободно проникать в детектор. Эти нейтроны могут имитировать искомые сигналы.

Составляющую в) – фон от радона в атмосфере помещений, трудно учитывать, так как концентрация радона величина не постоянная в силу подвижности и хорошей растворимости в воде этого газа, что затрудняет проведение точных измерений.

Радон непрерывно генерируется в горных породах в процессе радиоактивного распада, то есть всегда присутствует в любом горном массиве, и уменьшение его концентрации происходит как за счёт распада (период полураспада радона равен 3.825 дня), так и за счёт миграции из массива в воздух. Однако же новая генерация газа появляется из цепочки распадов урана. Поэтому среднее содержание радона в грунте всегда постоянно и определяется концентрацией урана в этом массиве. Некоторые исследования показывают связь аномальных выбросов радона перед крупными землетрясениями и отражает деформацию земной коры [16, 17, 18]. Радиоактивная природа радона делает его мощным индикатором движения земной коры и потенциально эффективным маркером для изучения процессов, связанных с подготовительной фазой землетрясений.

При деформациях земной коры увеличивается количество микротрещин, возникает напряжение и усиливается вибрация грунта, что приводит к значительному повышению концентрации радона. На возможности установки LVD для изучения вариаций концентрации радона под землей было обращено внимание сотрудниками коллаборации LVD Джовани Бадино и Вальтером Фуджионе после обнаружения аномального повышения фонового темпа счета детектора во время сильного землетрясения в Центральной Италии в сентябре 1997 года (рис. 1). Эпицентр толчков находился в Перуджи, примерно в 100 км от установки.

После похожего увеличения темпа счета в 1999 году, которое по времени появления было ассоциировано с разрушительным землетрясением в Турции, началось целевое изучение вариаций темпа счёта низкоэнергетичных фоновых событий, которые отражают временное поведение концентрации радона. С ним связываются надежды выделить предвестники сильных землетрясений [19].

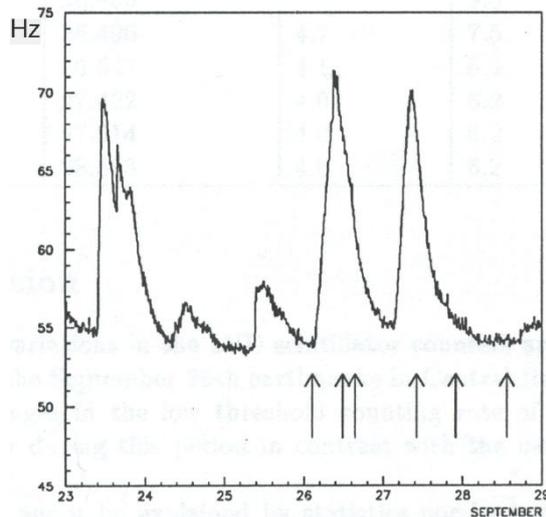


Рисунок 1 – Скорость счета установки LVD во время землетрясения в Италии в 1997 году. Стрелками отмечены моменты сейсмических толчков с магнитудой >4 .

Во всем мире ведутся исследования по выделению радоновых предвестников землетрясений [20]. Наблюдения показывают, что процесс подготовки сейсмических событий сопровождается изменением концентрации радона в атмосфере подпочв. Примеры такого явления приведены в работе [21]. Нередко наблюдается отклик установки LVD на повышение сейсмической активности. В ряде случаев видно повышение скорости счета по низкому порогу за 2-3 дня до землетрясения, что дает надежду на возможность предсказания готовящегося события. На рисунке 2 представлен пример данных с установки LVD в момент землетрясения 26 октября 2016 года. Красными линиями отмечены моменты только самых сильных сейсмических толчков с магнитудами от 4.5 до 6.5 [22]. Эпицентр землетрясения находился недалеко от лаборатории LNGS, как видно на рисунке справа.

Прогноз землетрясения предполагает предсказание, с известной достоверностью, трёх характеристик: силы, времени и места очага землетрясения [23]. Скорость выхода радона не постоянна и зависит от различных параметров. Изучение этих зависимостей может помочь разработать методику предсказания землетрясений по радоновым предвестникам. Для этого необходимо выявить все факторы, влияющие на ускоренный выход радона из грунта и выделить

характеристики вариаций концентрации радона под землей, коррелирующие со временем сильных землетрясений.

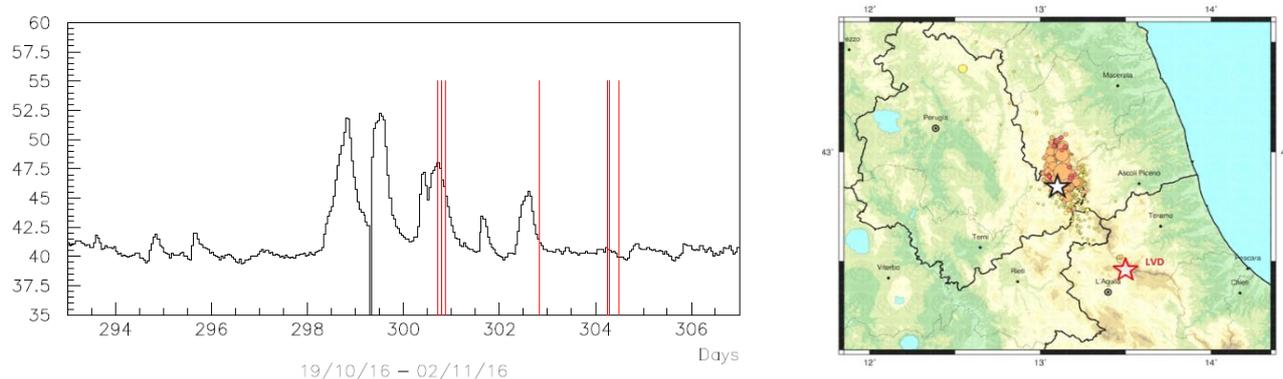


Рисунок 2 – Скорость счета установки LVD во время землетрясения в Италии в 2016 году. Красные линии - моменты сейсмических толчков.

Изучению влияния изменения атмосферного давления на скорость счета гамма-квантов, а значит, и на изменение концентрации подземного газа радон, выделяющегося в зоне разломов тектонических плит и геоблоков, посвящено несколько работ последних лет [24, 25, 26]. Авторы исследовали связь между землетрясениями и потоком зарегистрированных гамма-квантов, нейтронов, мюонов, ионов, акустических сигналов как на поверхности, так и под землей. Более того увеличение скорости счета частиц происходило и до землетрясений. Объяснением этим явлениям служит теория напряженно-деформируемого состояния земной коры и интенсивного потока сейсмогенных аэрозолей и газов [27, 28, 29]. В работах [26, 30] были обнаружены локальные возмущения барических полей как предвестников за несколько суток до землетрясений.

В работе [31] авторами изучался временной ход содержания урана в подземных водах лаборатории LNGS. За три года было обнаружено около 10 нерегулярных выбросов в измерениях концентрации урана более, чем в полтора раза. Аномалии в поведении концентрации урана авторы связывают с увеличением потоков глубинных флюидов на уровнях средней и нижней коры, и с геодинамикой землетрясений.

В лаборатории LNGS эксперимент DAMA/LIBRA, в котором использовались 250 кг чрезвычайно радиочистых кристаллов NaI(Tl), записывал данные с 2003 года [32]. Детекторы размещены в герметичном низкорadioактивном медном боксе, установленном в центре низкорadioактивного многослойного экрана (ПТФЭ, фольга Cd, Pb, Cu). Бетон толщиной около 1 м (сделанный из горного материала Гран-Сассо) почти полностью окружает этот пассивный экран, действуя как дополнительный замедлитель нейтронов. Опубликованные к настоящему времени результаты подтвердили ежегодную модуляцию сигналов очень низкой энергии, индуцированных в детекторе [33]. В частности, при кумулятивном воздействии амплитуда модуляции одиночных событий в энергетическом интервале (2–6) кэВ, измеренная в мишени NaI(Tl), составляет (0.0116 ± 0.0013) (событий в день)/(кг*кэВ); измеренная фаза составляет (146 ± 7) дней, а измеренный период – (0.999 ± 0.002) лет, что хорошо согласуется с ожидаемыми для частиц темной матери. Другие эксперименты, пока не подтвердили результат DAMA/LIBRA.

Стоит обратить внимание, что в подземных экспериментах также обнаружены годовые вариации в скоростях счета мюонов (187 ± 3) суток [2], нейтронов (7.0 ± 0.5) мес. [13] и гамма-квантов (8.1 ± 0.4) мес. Полученная фаза их модуляций отлична от фазы DAMA/LIBRA, но разброс фаз достаточно большой и зависит от выбранного периода наблюдений и связан с сезонными вариациями температуры.

Изучению радон-нейтронных приливных вариаций в земной коре, связанных с лунными периодами и имеющих гравитационное происхождение посвящено несколько работ [34, 35]. В работе [35] получены суточные и месячные приливные вариации концентрации радона в земной коре. На концентрацию радона влияют многие факторы: изменение температуры, влажности, давления, вибрация грунта. В работе [36] были обнаружены спорадические увеличения потока тепловых нейтронов, которые объясняются адвекцией грунтовых газов (эффект барометрической откачки радона).

Сезонные вариации потока мюонов и нейтронов связаны с температурным расширением атмосферы в летний период и ее сжатием зимой. Вариации гамма-квантов связаны с инъекцией радона в подземный зал и насыщением горных пород водой. Сезонные вариации потока мюонов, нейтронов и гамма-квантов могут имитировать вариации потока темной материи, что побуждает более детально изучать фон под землей.

Настоящее исследование посвящено изучению с помощью детектора LVD вариаций гамма-квантов от естественной радиоактивности в подземном зале LNGS и их связи с различными источниками.

Нейтринный детектор LVD непрерывно работает по программе регистрации нейтрино от вспышек сверхновых в нашей галактике. Естественная радиоактивность и атмосферные мюоны являются фоном детектора. Имеющаяся статистика данных детектора составляет более 20 лет. Анализ большого набора данных позволяет получить результат с большой точностью.

Актуальность

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 явлениями. Низкая статистическая обеспеченность и противоречивость имеющихся на сегодня результатов не позволяет 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 отбора сцинтилляционных счетчиков для непрерывного мониторингования скорости счета гамма-квантов от радона и его дочерних продуктов распада.

Уникальность метода и большая статистика позволяет 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 концентрации радона в подземном помещении равной 20 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 $\phi_y = (7.5 \pm 0.5)$ 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 ~ 1000 м над уровнем моря при давлении 680 мм рт.ст.).

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов обоснована использованием стандартных методов анализа экспериментальных данных, а также их сравнением с результатами, полученными другими авторами. Выводы пункта 3 положений, выносимых на защиту, находятся в соответствии с результатами моделирования фоновых событий в LVD от естественной радиоактивности грунта и материалов

конструкции детектора с использованием программного комплекса Geant4 версии 10.3. Выводы пункта 4 подтверждает сравнительный анализ с вариациями, полученными на установке LSD за один и тот же период. Достоверность результатов пункта 5 обусловлена их высокой статистической обеспеченностью (использовались непрерывные данные за 17 лет). Выводы пункта 6 подтверждаются совпадением результатов при использовании двух разных независимых методик, а также проведенным Фурье анализом. Выводы пункта 7 основаны на анализе больших временных рядов данных (более 20 лет).

Апробация результатов

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 [19, 37–50], 13 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.

В первой главе приведено описание детектора LVD, его конструкции с указанием местоположения и параметров сбора данных. Приведены характеристики подземного зала эксперимента, состав грунта и величины концентрации радиоактивных ядер. Подробно описан метод анализа измеряемых гамма-квантов в детекторе. Приведены примеры, получаемых временных рядов.

Во второй главе показана связь измеряемой скорости счета гамма-квантов на LVD с концентрацией радона под землей. Описан эксперимент, подтверждающий эту связь. Описаны обнаруженные техногенные вариации скорости счета гамма-квантов. Это суточные и недельные вариации. Показаны периоды с разной системой вентиляции в зале детектора. Доказывается техногенный характер суточных и недельных вариациях при сравнении поведения временных рядов в рабочие и в нерабочие дни, а также во время пандемии Ковид-19.

В третьей главе обсуждается связь скорости счета гамма-квантов с атмосферным давлением и параметрами температуры и влажности в экспериментальном зале.

Четвертая глава посвящена геофизическим и гравитационным эффектам, которые модулируют скорость счета гамма-квантов под землей. Описаны лунно-месячные и сезонно-годовые вариации.

В заключении даны основные выводы диссертации и обозначены планы дальнейшей работы.

Глава 1. Описание детектора LVD и метод регистрации

1.1 Описание детектора LVD

Детектор большого объема (Large Volume Detector) создан совместными усилиями научных организаций Национального института ядерной физики Италии (INFN) и Института ядерных исследований РАН (г. Москва) в рамках межправительственных соглашений между СССР и Италией, Россией и Италией о сотрудничестве в области астрофизики.

С помощью установки LVD проводятся подземные исследования по нейтринной астрофизике и физике космических лучей. Основная задача – поиск нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звездных ядер [51]. 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 CaCO_3 и MgCO_3 со средней плотностью $\rho \sim 2.6 \text{ г/см}^3$ [52]. Грунт массива Гран Сассо имеет низкую радиоактивность, что очень важно для современных низкофоновых подземных экспериментов. Географические координаты Лаборатории $47^\circ 27'$ с.ш., $13^\circ 34'$ в.д. 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 (рис. 1.1). Установка LVD расположена в зале А (Hall A).

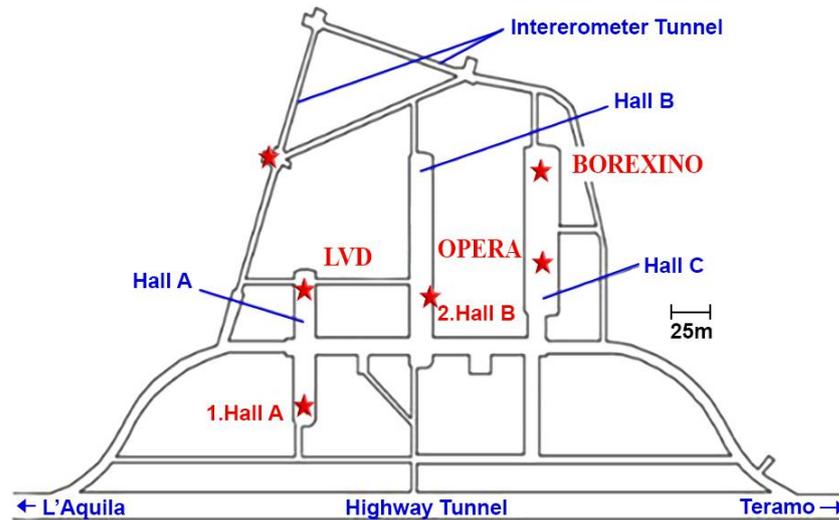


Рисунок 1.1 – Схема подземной лаборатории Гран Сассо.

Установка LVD вводилась в строй поэтапно. Первая башня начала работать в полном объеме в июне 1992 года. В тот момент она имела восьмой этаж из трех модулей. Вторая башня в такой же конфигурации была запущена в 2000 году. Третья башня начала набор данных в 2002 году. Общий вид установки LVD показан на рисунке 1.2.

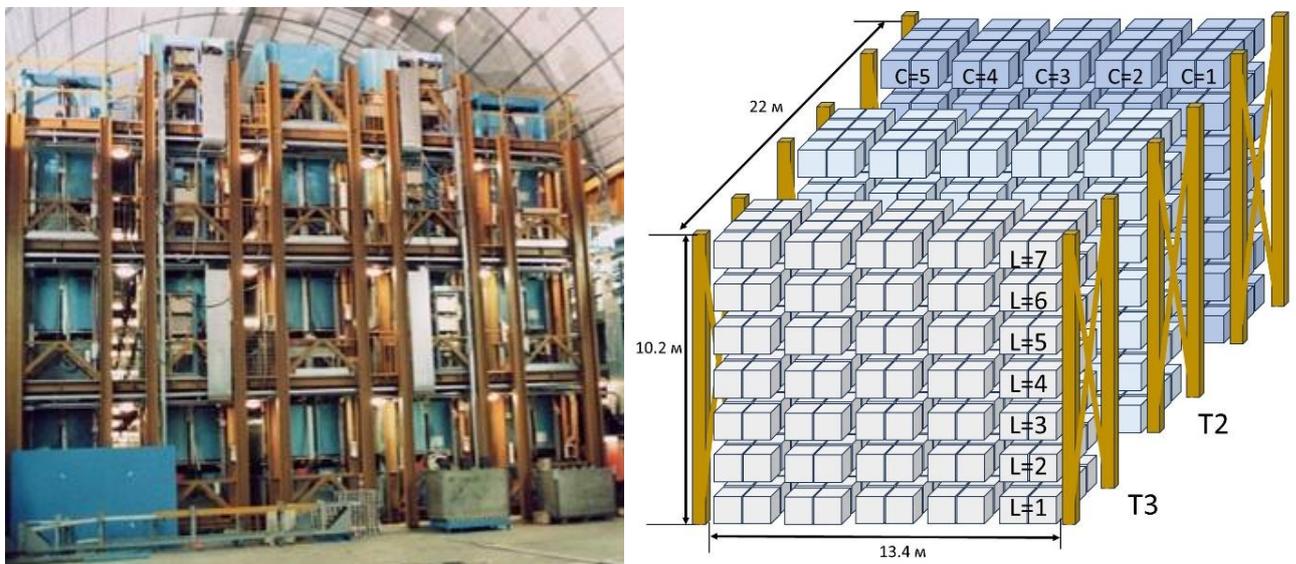


Рисунок 1.2 – Общий вид установки LVD и схема расположения портотанков.

Установка LVD содержит 1000 тонн жидкостного сцинтиллятора и 1000 тонн железа. Она имеет модульную структуру. Сцинтиллятор заполняет 840 счётчиков объёмом 1.5 м^3 каждый [51]. Счётчик имеет форму, близкую к кубической ($100 \times 100 \times 150 \text{ см}^3$), сделан из нержавеющей стали толщиной 4 мм (рис.1.3).



Рисунок 1.3 – Общий вид одного счетчика LVD (слева) и верхняя грань счетчика, с вмонтированными ФЭУ (справа).

Счётчики помещены по 8 штук в металлические модули-контейнеры (портотанки), толщина стенок которых 20 мм, из них набираются вертикальные колонны (7 модулей). Пять таких колонн объединяются в башню. Таким образом, одна башня содержит 35 модулей с 280 счётчиками (рис. 1.2). Всего 3 башни по 280 счётчиков каждая.

Основу сцинтиллятора составляет уайт-спирит – смесь ароматических углеводородов с общей формулой – C_nH_{2n} , где $n \approx 9.6$ [53]. Плотность уайт-спирита при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $\rho = 0.778 \pm 0.02 \text{ г/см}^3$, коэффициент объемного расширения – $(1.23 \pm 0.04) \times 10^{-3} \text{ град}^{-1}$, показатель преломления равен 1.5 для света с длиной волны 420 нм. Температура вспышки уайт-спирита в открытом объеме $36 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Для получения высокой прозрачности сцинтиллятора

основа очищалась прогонкой под давлением через сорбенты Al_2O_3 и цеолит. Прозрачность контролировалась на длине волны спектрофотометра 420 нм методом «выхода из пучка» по интенсивности света, проходящего через столб жидкости 60 см. Спектр излучения сцинтиллятора и спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ хорошо согласуются. Сцинтиллятор в счетчике продувается аргоном с целью вытеснения растворенного в нем кислорода из воздуха, который подавляет сцинтилляции. Средняя прозрачность уайт-спирита после очистки около 20 м, на этой длине интенсивность света падает в e раз. Все материалы счетчиков химически инертны по отношению к веществу жидкого сцинтиллятора, что препятствует падению его прозрачности. Для увеличения светосбора внутренняя поверхность счетчиков покрыта слоем тонкой алюминизированной пленки (майларом) с коэффициентом отражения ≈ 0.9 для $\lambda = 420$ нм.

На верхней грани установлены три спектрометрические фотоумножителя с диаметром фотокатода 15 см (ФЭУ-49Б или ФЭУ-125), включенные на совпадение. Фотокатоды расположены в плоскости внутренней поверхности крышки и сопрягаются со сцинтиллятором посредством иллюминаторов, изготовленных из несцинтиллирующего оргстекла (плексигласа). Иллюминатор своей толщиной ограничивает дистанцию близких засветок фотокатода, способных вызвать большой сигнал на ФЭУ, и, таким образом, уменьшает неоднородность светосбора. Коэффициенты преломления жидкостного сцинтиллятора и веществ всех элементов сопряжения (оргстекло-вазелин-стекло) имеют практически одинаковые значения для света, излучаемого сцинтиллятором (370–500 нм). Пропускание этих элементов, ввиду их небольших толщин, на уровне 100%, поэтому полная потеря света на границах сред и в них самих не превышает 5%. Квантовая эффективность фотокатода $\sim 10\%$, а коэффициент усиления ФЭУ – $3 - 4 \times 10^5$. Среднее количество фотоэлектронов с фотокатода одного ФЭУ, приходящееся на 1 МэВ энерговыделения, составляет примерно 5 - 6. ФЭУ калибруются с помощью гамма-источника (^{60}Co): напряжение на каждом ФЭУ устанавливается таким образом, чтобы получить заранее определенное

значение силы тока, когда калибровочный источник помещается в определенную точку.

В фотоэлектронных умножителях, работающих в режиме больших усилений, за основным сигналом следуют послеимпульсы. Число послеимпульсов прямо пропорционально величине засветки, а их количество увеличивается с ростом коэффициента усиления ФЭУ. Фотоумножители с более высоким уровнем шума имеют большее число послеимпульсов. Для уменьшения этого эффекта события в каждом счетчике регистрируются тремя ФЭУ, включенными на совпадение, число послеимпульсов при этом снижается в десятки раз [54].

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) [1]. 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: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, $n + p \rightarrow d + \gamma$. Образовавшийся в результате первой реакции нейтрон замедляется и захватывается на свободном протоне, образуя ядро дейтерия с испусканием гамма-кванта с энергией 2.2 МэВ. Среднее время жизни нейтрона в счетчике до захвата в сцинтилляторе ≈ 185 мксек. Нейтрон может быть также захвачен ядром железа контейнера счетчика: $n + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{57}\text{Fe} + \gamma$. При этом рождаются гамма-кванты с максимальной энергией 10.16 МэВ. Регистрируемое среднее время жизни нейтрона до захвата на железе составляет ≈ 110 мксек. Таким образом, при взаимодействии антинейтрино с протоном сцинтиллятора регистрируются два сигнала: первый связан с регистрацией позитрона, второй – с регистрацией гамма-кванта.

Наличие железа в детекторе делает его чувствительным к электронным нейтрино с энергией >20 МэВ. Взаимодействие нейтрино с железом происходит благодаря реакции $\nu_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{56}\text{Co}^* + e^-$. Возбуждение кобальта снимается испусканием одного или нескольких гамма-квантов с общей энергией от 1.72 до

10.7 МэВ. Возможна также реакция по нейтральным токам $\nu_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow \nu'_e + {}^{56}\text{Fe}$. Снятие возбуждения железного ядра в данной реакции происходит путем испускания гамма-кванта с энергией ~ 7.6 МэВ [55, 56].

Триггером для регистрации суммарной по трем ФЭУ амплитуды импульса является трехкратное совпадение импульсов НЕТ в интервале 250 нс. Триггер открывает в счетчиках временное окно длительностью 1 мс: в это время регистрируются импульсы трехкратного совпадения LET [1].

Параллельно, для непрерывного наблюдения за фоном низкоэнергетичных импульсов, существует система регистрации, не зависящая от прихода триггерных частиц высокой энергии (scaler). Она открывает порог LET каждые 10 минут на 10 секунд и записывает количество импульсов, зарегистрированных в каждом счетчике (подробнее описана в пункте 1.3).

Сцинтилляционные счетчики установки LVD в соответствии со своим местоположением делятся на внутренние и внешние. Внутренние защищены от окружающей горной породы хотя бы одним слоем внешних счетчиков. С 9.06.1992 по 31.12.2005 гг. верхние пороги регистрации (НЕТ) составляли 7 МэВ для внешних счетчиков и 5 МэВ для внутренних [57]. С 1 января 2006 года на всех счетчиках установлен верхний порог регистрации 4 МэВ. Величина нижнего порога (LET) выбиралась из соображений эффективной регистрации гамма-кванта с энергией 2.2 МэВ от захвата нейтрона в условиях естественной радиоактивности горной породы. Нижний порог регистрации составляет 0.5 МэВ. На рисунке 1.4 показаны формы низкого (LET) и высокого (НЕТ) порогов для внутренних счетчиков установки LVD [58]. Темп счета каждого счетчика выше LET составляет ~ 50 Гц во внутренних счетчиках и ~ 300 Гц – в наружных. Для НЕТ импульсов темп счета наружных и внутренних счетчиков примерно одинаков и составляет ~ 0.02 Гц.

Зал эксперимента LVD (зал А) имеет объём 24000 м^3 , из них около 2000 м^3 занимает оборудование. Ввоз-вывоз оборудования производится через двое ворот. При закрытых воротах и заблокированных затворах принудительной вентиляции зал практически герметичен в смысле его сообщения с атмосферой других

помещений. Приток свежего воздуха обеспечивается приточной вентиляцией с мощностью 8000 м³/час. Забор воздуха идёт “из долины”, содержание радона в нем незначительно. Вентиляция, по требованиям техники безопасности, работает постоянно, она выключается в редких случаях по технической необходимости. При выключенной вентиляции примерно через час начинается заметное нарастание концентрации радона. Температуру в экспериментальном зале можно считать постоянной на уровне примерно +20°C (см. Главу 3). Все эти детали важны с точки зрения изучения вариаций концентрации радона в данном подземном помещении.

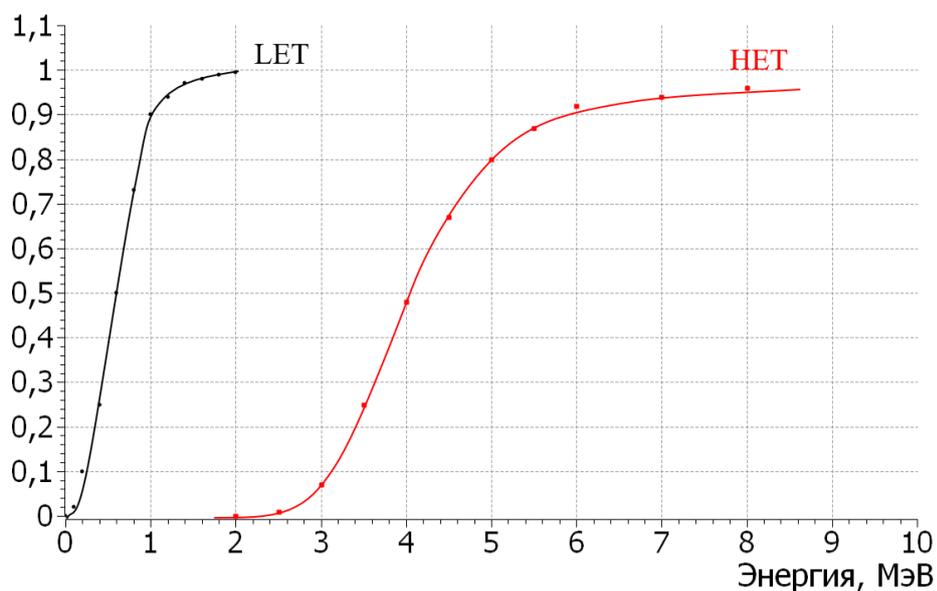


Рисунок 1.4 – Формы низкого (LET) и высокого (HET) порогов для внутренних счетчиков установки LVD.

1.2 Фон естественной радиоактивности в зале эксперимента LVD, происхождение радона

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. Природный уран состоит из двух изотопов: ^{238}U (99.3 %) и ^{235}U (0.7 %). Природный торий практически полностью состоит из изотопа ^{232}Th . Природный калий состоит из трёх изотопов: радиоактивного ^{40}K (0.012 %) и двух стабильных – ^{39}K (93.3 %) и ^{41}K (6.7 %). Среднее содержание урана, тория и калия в значительной мере зависит от типа горных пород. Содержание естественных радиоактивных элементов в почвах определяется радиоактивностью исходных материнских пород и совокупностью последующих процессов почвообразования. На рисунке 1.5 представлены наиболее вероятные цепочки распадов семейств урана-235, урана-238 и тория-232 [59, 60].

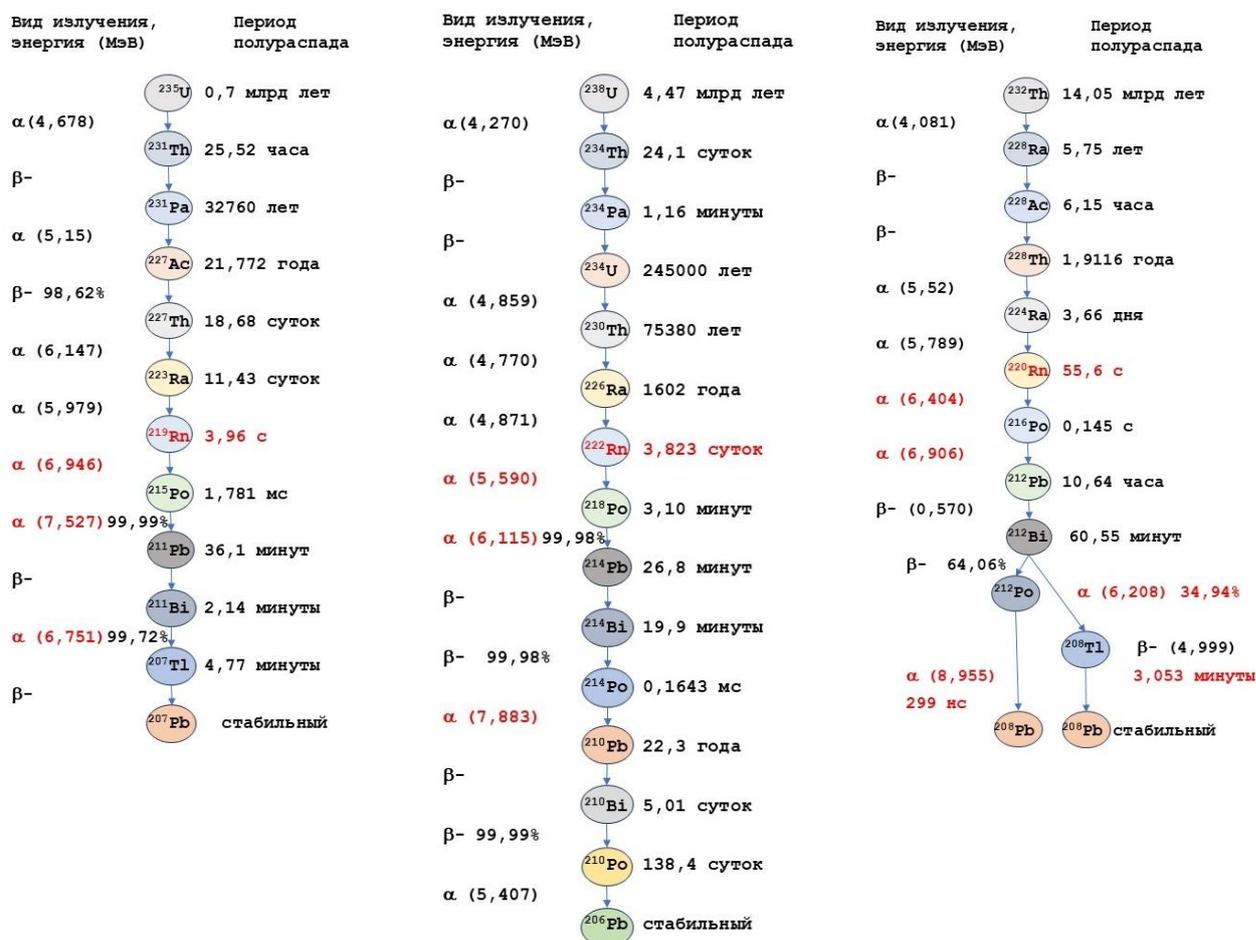


Рисунок 1.5 – Наиболее вероятные цепочки распадов семейств урана-235, урана-238 и тория-232.

Концентрации ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в образцах породы зала А были измерены в 1985 году [4, 5]. В таблице 1.1 показаны результаты экспериментальных замеров концентрации природных радиоактивных элементов в грунте туннеля Гран Сассо. Авторы пришли к выводу, что нормальная порода имеет очень низкую активность. Присутствуют инфильтраты пород с гораздо более высокой активностью. Однако области высокой активности составляют лишь один процент от общей поверхности стен зала А.

Таблица 1.1 Активность грунта в туннеле Гран Сассо [4].

Место взятия пробы	^{232}Th	^{238}U	^{40}K	^{214}Bi
Зал А N1, Бк/кг (инфильтрат)	$8.8 \pm 0,3$	$84.7 \pm 8,4$	224 ± 6	41.9 ± 0.6
Зал А N2, Бк/кг (инфильтрат)	$7.7 \pm 0,4$	66.8 ± 7.1	256 ± 13	41.7 ± 0.9
Зал А N3, Бк/кг (инфильтрат)	9.5 ± 0.4	122 ± 13	264 ± 13	$56,6 \pm 1.4$
Зал А N4, предел на 95% у. д. (обычный, основной грунт)	<0.5	<8	<5	1.0 ± 1.2
Зал В, Бк/кг	0.25 ± 0.08	5.2 ± 1.3	5.1 ± 1.3	4.2 ± 0.3
Зал С, Бк/кг	0.27 ± 0.10	8.2 ± 1.7	2.9 ± 1.4	5.1 ± 0.2

Высокие требования предъявляются экспериментом к допустимому уровню загрязненности естественными радионуклидами вещества мишени и конструкционных материалов детектора. Гамма-активность конструкционных материалов также обусловлена дочерними радионуклидами урана и тория. В

работе [61] приведены результаты измерений содержания радиоактивных примесей в различных материалах, полученные на низкофоновом полупроводниковом гамма-спектрометре. Группой А.В. Копылова был создан низкофоновый гамма-спектрометр на основе германиевого детектора с объемом 100 см^3 и детектора NaI(Tl), который является активной защитой от заряженной компоненты космических лучей и комптоновских гамма-квантов. Спектрометр позволял измерять концентрации ^{238}U и ^{232}Th на уровне $\sim 10^{-10}$ г/г для образцов массой 1 кг. В таблице 1.2 приведены результаты измерений содержания ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в основных конструкционных материалах счетчика установки LVD.

Таблица 1.2 Содержание ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в основных конструкционных материалах счетчика установки LVD.

	^{238}U , г/г	^{232}Th , г/г	^{40}K , г/г
стекло ФЭУ-49Б	$(6.4 \pm 1.8) \times 10^{-7}$	$(11 \pm 3) \times 10^{-7}$	$(4.9 \pm 1.0) \times 10^{-4}$
нерж. сталь	$< 9.7 \times 10^{-9}$	$(2.9 \pm 2.3) \times 10^{-9}$	
сцинтиллятор	$\leq 10^{-10}$		

Корпус счетчиков сварен из листов нержавеющей стали толщиной 4 мм и весит 290 кг (для первой и второй башен). Масса сцинтиллятора каждого счетчика первой и второй башен 1170 ± 20 кг. Стекло ФЭУ-49Б имеет диаметр 170 мм и толщину 10 мм. Используя данные, приведенные в таблице 1.2, можно оценить содержание ^{238}U в одном счетчике. Оно составляет примерно 5×10^{-3} г.

Радон — это радиоактивный газ без запаха, цвета и вкуса. Он образуется в процессе природного радиоактивного распада урана и тория. Радон не имеет стабильных изотопов. Наиболее устойчив ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3.8235$ суток), входящий в природное радиоактивное семейство урана-238 и являющийся непосредственным продуктом распада радия-226. В семейство тория-232 входит ^{220}Rn ($T_{1/2} = 55.6$ с), иногда его называют торон (Tn). В семейство урана-235 входит ^{219}Rn ($T_{1/2} = 3.96$ с), его называют актинон (An). Все эти изотопы радона испытывают альфа-распад.

Радон хорошо растворяется в воде и переносится подземными водами. ^{222}Rn имеет длительный период полураспада, поэтому может накапливаться в помещениях в значительных количествах. Также он довольно распространен в силу высокой концентрации урана-238. Миграция радона в горном массиве и его выделение с поверхности определяются макроскопическим коэффициентом диффузии, который зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются пористость, проницаемость и трещиноватость. Радон выходит в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в породе.

Радон является газом опасным для здоровья людей, поэтому технические службы раз в полгода проводят точечные замеры концентрации радона во всех помещениях подземной лаборатории. Приведены данные такого замера в 2015 году. На рисунке 1.6 показана схема зала *A*, где расположена установка LVD и точки – замеры концентрации радона. Концентрация радона в разных подземных помещениях Лаборатории отличается, она зависит от концентрации урана и тория в скале, от качества изоляции помещения от скалы и устройства системы вентиляции. В таблице 1.3 представлены значения средней концентрации ^{222}Rn в разных помещениях Лаборатории Гран Сассо по данным дозиметрических служб. В зале эксперимента LVD постоянно работает принудительная вентиляция, которая обеспечивает приток свежего воздуха с низким содержанием радона. Средняя концентрация радона в зале невысокая и составляет порядка 26 Бк/м³.

Таблица 1.3 Средняя концентрация ^{222}Rn в разных залах лаборатории LNGS.

Средняя концентрация ^{222}Rn	
Зал <i>A</i>	26 Бк/м ³
Зал <i>B</i>	43 Бк/м ³
Зал <i>C</i>	104 Бк/м ³

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.

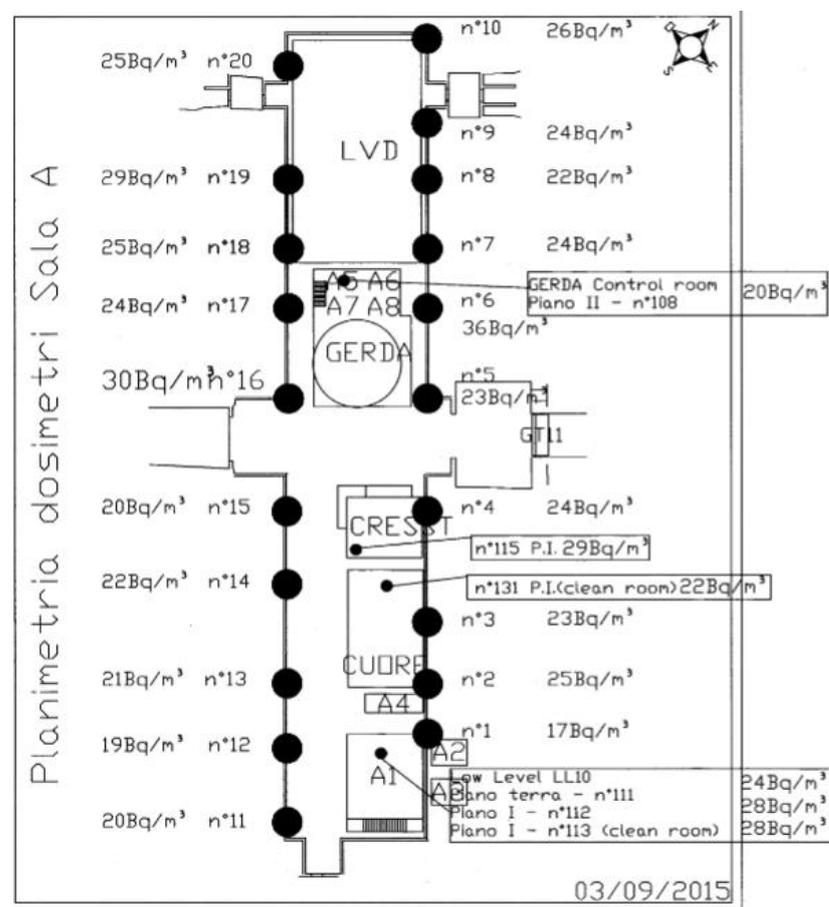


Рисунок 1.6 – Схема зала А в 2015 году с замерах концентрации радона дозиметрическими службами.

В процессе проектирования в LNGS эксперимента XENON массой 1 тонна была проведена серия измерений спектров низкоэнергетичных ($E < 3$ МэВ) гамма-квантов, в основном обусловленных распадом радиоизотопов в породе и бетоне [62, 63]. Целью было измерение и сравнение потока гамма-излучения в различных помещениях подземной лаборатории Гран Сассо и оценка

экранирующей способности эксперимента LVD. Для достижения этой цели использовался детектор, имеющий в качестве активной среды кристалл йодида натрия, легированный таллием (NaI(Tl)). Модель детектора — Canberra Inspector™1000, он изготовлен из кристалла NaI(Tl) размером 200x200 мм², оптически соединенного с ФЭУ. Охватываемый диапазон энергий составляет от 50 КэВ до 3 МэВ. Детектор представляет собой портативную модель, в которую встроены 10-битный многоканальный анализатор. Интерфейс USB обеспечивает связь с главным компьютером для передачи данных. На рис. 1.7 приведены для сравнения полученные спектры. Между ними нет заметных различий, за исключением спектра, измеренного внутри установки LVD, интенсивность которого примерно в 10 раз ниже.

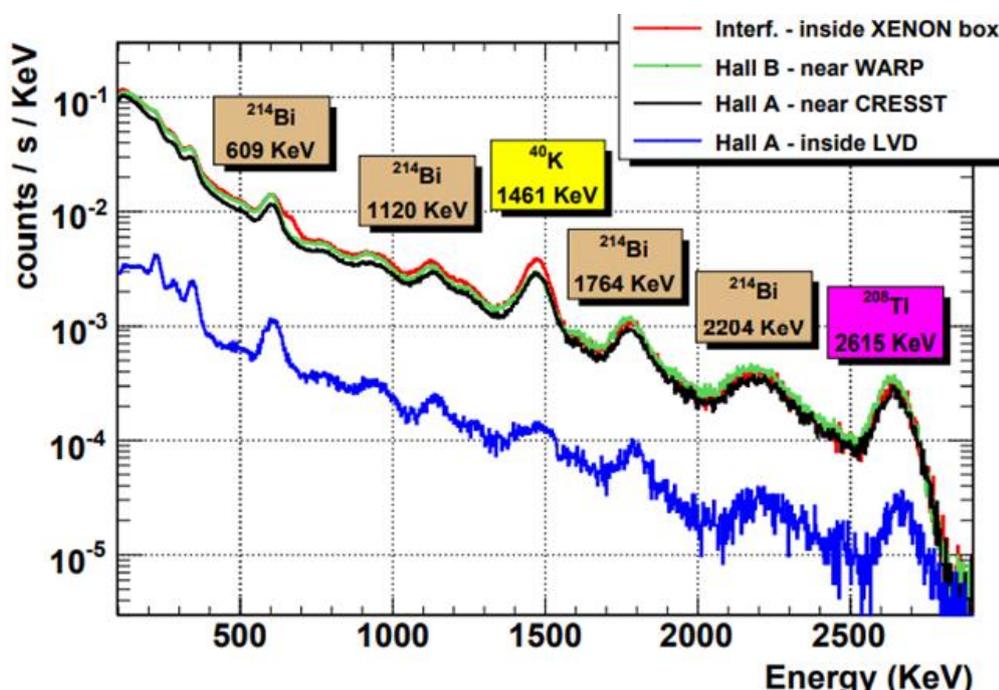
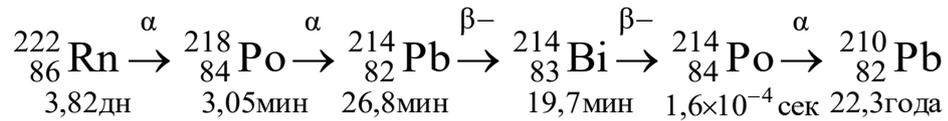


Рисунок 1.7 – Спектр гамма-квантов, измеренный в разных точках подземной лаборатории LNGS.

На рисунке 1.7 видны четыре пика соответствующие гамма-квантам от ²¹⁴Bi, который является продуктом распада ²²²Rn. 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. Состав и эффективность регистрации представлены в таблице 1.4. Нижний порог регистрации во внутренних счетчиках установки LVD – 0.5 МэВ, поэтому установка способна фиксировать весь диапазон гамма-квантов от дочерних ядер радона. Для низких энергий эффективность регистрации в основном зависит от флуктуаций количества фотоэлектронов, вылетающих с катода фотоумножителя. Для энергии в 1 МэВ – это в среднем 6 ± 3 фотоэлектронов.

Таблица 1.4 Энергетический спектр и эффективность регистрации гамма-излучения от ядер ${}^{214}_{83}\text{Bi}$.

Энергия γ -кванта, МэВ	Количество γ -квантов на 100 ядер ${}^{214}\text{Bi}$	Эффективность регистрации, %
0.609	47	15
1.764	17	95
1.120	17	65
1.238	6	80
2.204	5	97
1.378	5	85
0.769	5	30
1.400	4	85
2.445	2	98

1.3 Непрерывный канал регистрации низкоэнергетичных импульсов и отбор счетчиков

Система регистрации детектора содержит низкоэнергетичный канал, порог срабатывания которого 0.5 МэВ (для внутренних, защищенных от радиоактивности породы, счетчиков). Данные, используемые для исследования фона низкоэнергетичных импульсов (scaler), формируются следующим образом: каждые 10 минут все сцинтилляционные счётчики башни запускаются импульсом от генератора на регистрацию низкоэнергетичных импульсов в течение 10 секунд. 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 м².

Детектор LVD имеет модульную структуру и это очень удобно для проведения непрерывных наблюдений. Данные можно получать, даже в случае неисправности некоторых счетчиков. Для того, чтобы исключить влияние сбоев в работе отдельных счетчиков был проведен их отбор. Были построены распределения темпа счета за 10 секунд по каждому счетчику. Таким образом анализировалась работа каждого отдельного счетчика за несколько лет. Распределения выявили нестабильно работающие счетчики, разброс по темпу счета у которых очень большой. На рисунке 1.8 представлены примеры хорошей работы счетчиков и нестабильно работающих.

Хочется отметить также, что стабильные счетчики сохраняют свои характеристики в течение многих лет. На рисунке 1.9 показаны распределения темпа счета одного и того же счетчика в 2001 и 2015 годах.

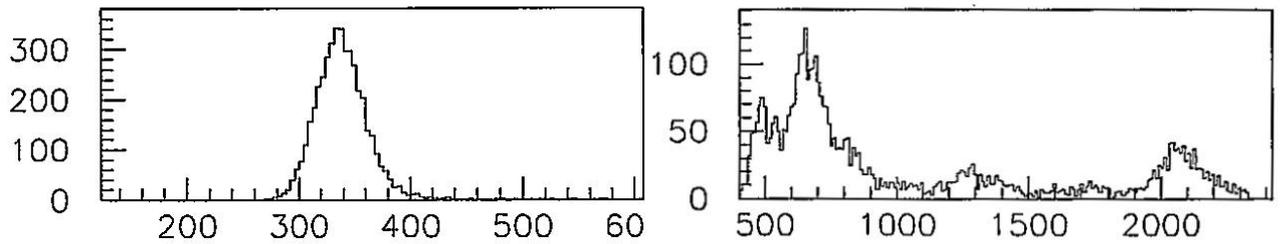


Рисунок 1.8 – Примеры распределения темпа счета за 10 секунд хорошего счетчика (слева) и нестабильно работающего (справа).

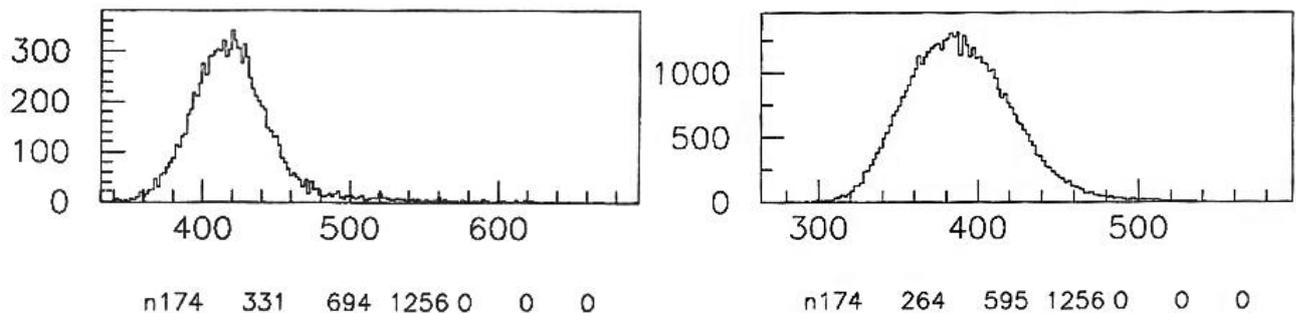


Рисунок 1.9 – Распределения темпа счета за 10 секунд одного и того же счетчика в 2001 (слева) и 2015 (справа) годах.

В результате анализа гистограмм распределений были определены границы величины скорости счета стабильно работающих счетчиков: от 200 до 2000 импульсов за 10 секунд для внутренних счетчиков и от 200 до 10000 импульсов за 10 секунд для наружных счетчиков. Долгосрочный анализ работы счетчиков также показал, что нельзя полностью отказаться от использования данных с нестабильных счетчиков. Если полностью исключить из анализа все счетчики, которые давали темп счета, не попадающий в границы, статистика резко уменьшится. Таким образом были определены критерии для автоматического отбора счетчиков. Для получения высокой статистики данные с каждого конкретного счетчика не используются только тогда, когда они в течение 10-ти секундного интервала выходят за указанные выше рамки. При этом полностью исключаются из рассмотрения все наружные счетчики установки LVD, т.к. для них слишком велик фон окружающей породы

(наружными считаются те, которые не защищены от радиоактивности скалы хотя бы одним слоем счетчиков).

1.4 Обработка и представление данных

Скорость счета низкоэнергетического канала измеряется автоматически каждые 10 минут. Сбор информации продолжается 10 секунд. Далее проводится отбор данных по критериям, описанным выше. Количество внутренних счетчиков по каждой башне равно 80. Число счетчиков, включаемых в обработку при каждом измерении варьируется. Например, по данным 2023 года, это число составляет 58 – 61 по первой башне, 54 – 56 по второй и 47 – 48 по третьей. 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)

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. На рисунках 1.10 и 1.11 показаны примеры графического представления экспериментальных данных на примере 2022 года. На рисунке 1.10 – скорость счета гамма-квантов на установке LVD за год по каждой из трех башен. На рисунке 1.11 – скорость счета гамма-квантов на установке LVD за две недели по каждой из трех башен. По оси абсцисс отложены часы с начала года. Фон по нижнему порогу можно разделить на две составляющие: постоянную, связанную с собственной радиоактивностью материалов установки и окружающей среды (в основном, скальной породы, в том числе и некоторой постоянной концентрацией радона) и переменную, обусловленную изменением концентрации радона в подземном зале эксперимента, вызванную внешними факторами (подробнее см. Главу 2).

Общее число отсчетов в одном бине составляет ~ 145000 (~ 400 отсчетов за 10 сек (для первой башни) $\times 60$ счетчиков $\times 6$ измерений в час), что дает относительную ошибку среднего $\sim 0.3\%$. Количество отсчетов, обусловленных радоном, для 60 счётчиков составляет около 3600 за 10 секунд. Это задаёт чувствительность метода 5% на уровне 3σ , т. е. за 10-ти секундный интервал измерений установка зафиксирует 5%-ое отклонение концентрации с достоверностью $\sim 99.7\%$.

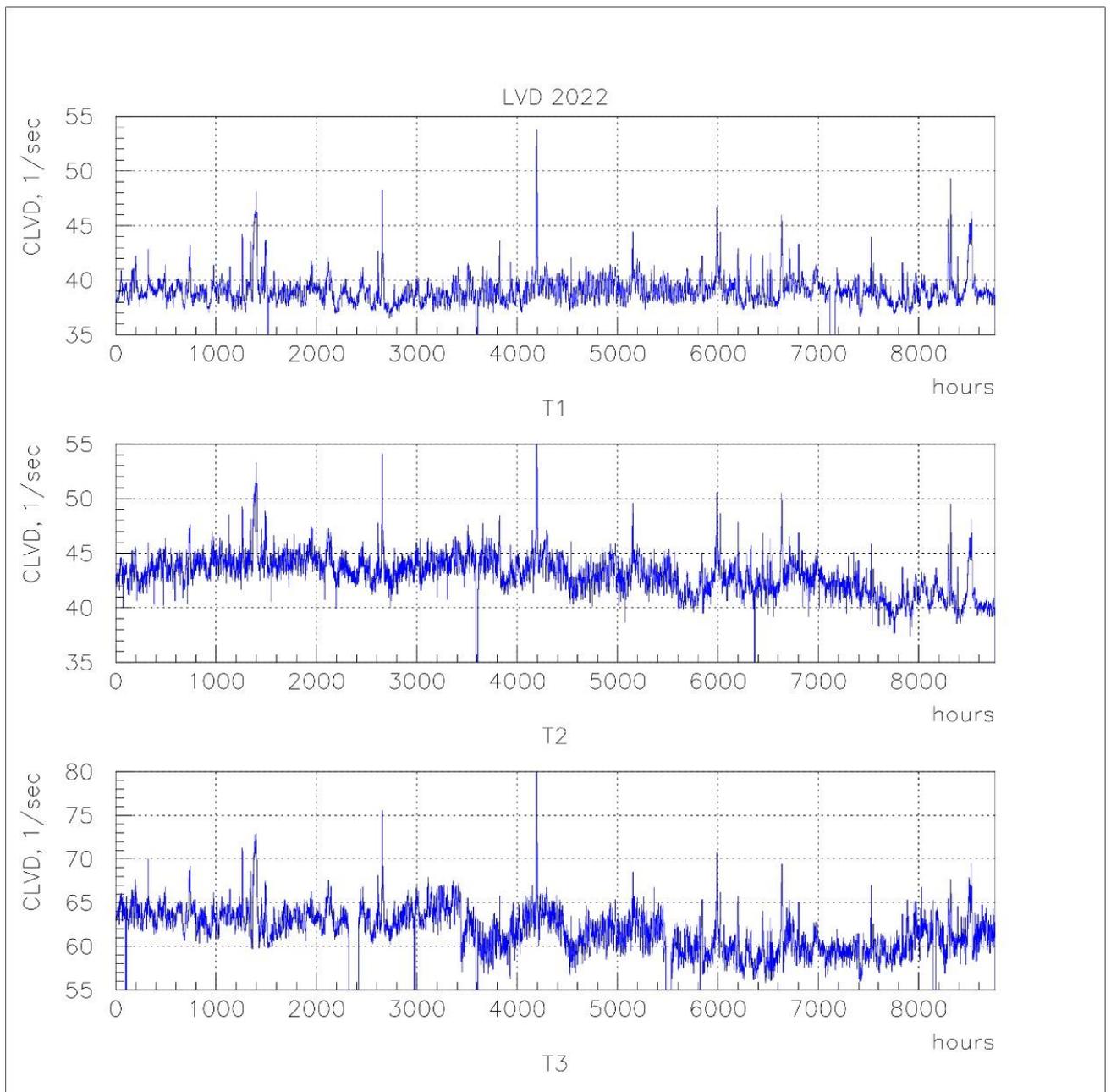


Рисунок 1.10 – Пример графического представления данных на примере 2022 года: скорость счета гамма-квантов на установке LVD за год по каждой из трех башен.

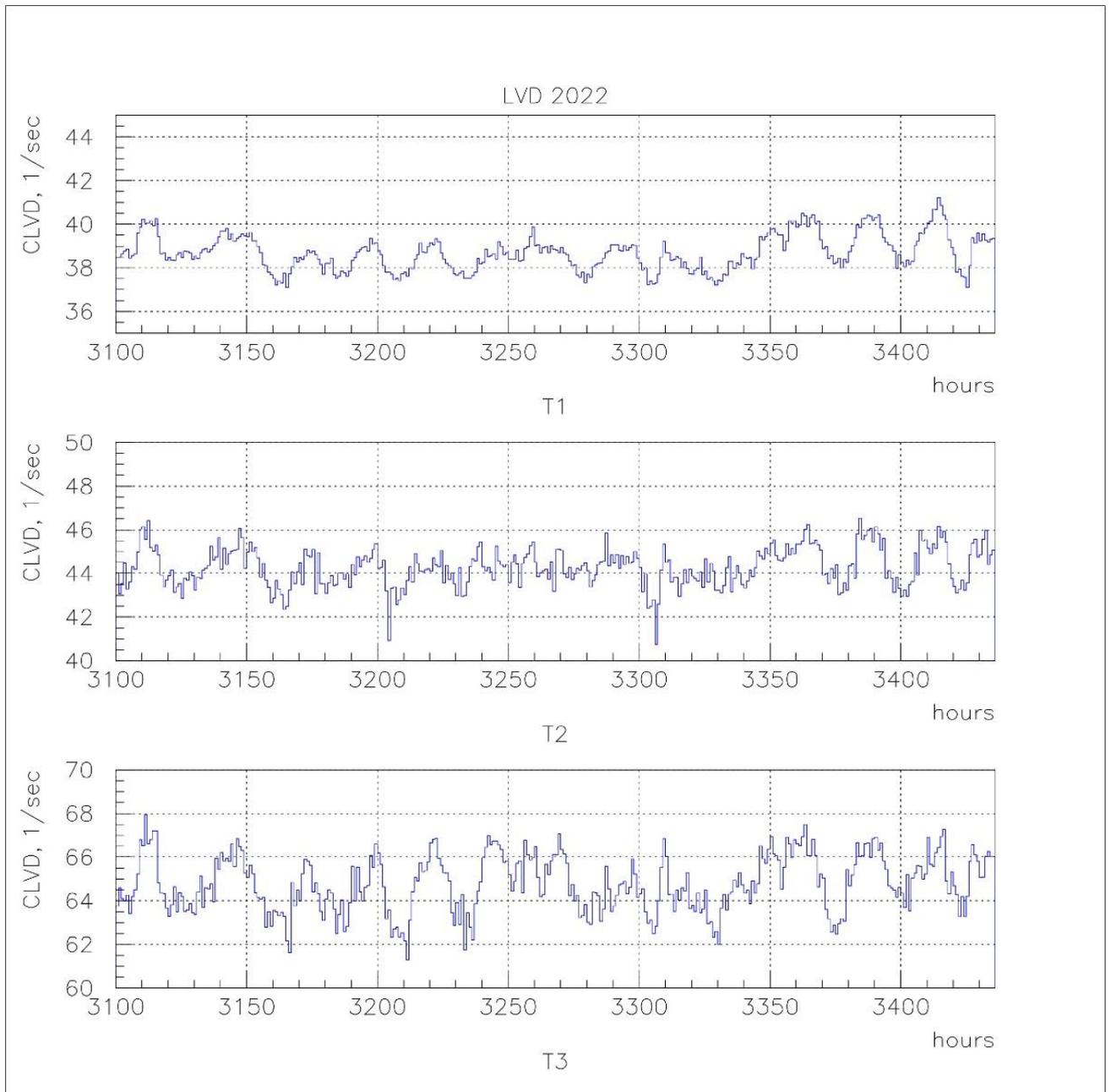


Рисунок 1.11 – Пример графического представления данных на примере 2022 года: скорость счета гамма-квантов на установке LVD за две недели по каждой из трех башен.

1.5 Выводы

Установка LVD предназначена для регистрации нейтрино от коллапсов звездных ядер в нашей Галактике. Основными источниками фона по низкому порогу ($E > 0.5$ МэВ) на LVD являются естественная радиоактивность грунта, материалов установки и радон. Детектор регистрирует гамма-кванты с энергиями в диапазоне от 0.5 МэВ до 3 МэВ от цепочек распада уранового и ториевого рядов.

Фон LVD по нижнему порогу можно разделить на две составляющие: постоянную, связанную с собственной радиоактивностью материалов установки и окружающей среды (в основном, скальной породы, в том числе и некоторой постоянной концентрацией радона) и переменную, обусловленную изменением концентрации радона в подземном зале эксперимента, вызванную внешними факторами.

Для изучения переменной составляющей радиоактивного фона – вариаций концентрации радона в атмосфере подземного зала детектора – полностью исключались из рассмотрения все наружные счетчики установки LVD. Внутренний объем детектора, защищенный от радиоактивности скалы хотя бы одним слоем счетчиков, составил 80 счетчиков по 1.5 м^3 для каждой башни.

В результате анализа временного распределения по каждому счетчику определены критерии для их автоматического отбора. Основным критерием отбора является скорость счета импульсов в диапазоне от 200 до 2000 отсчетов в течение 10-ти секундного интервала.

Разработан метод предварительной подготовки и представления экспериментальных данных LVD как в числовом, так и в графическом виде. Скорость счета гамма-квантов, регистрируемых в детекторе, усреднялась по часу и приводилась на счетчик в секунду. 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. Темп счета, обусловленный средней концентрацией радона 26 Бк/м^3 в атмосфере экспериментального зала LVD, составляет порядка 3600 отчетов за 10 сек. для одной башни. Это задает уникальную чувствительность метода (5% на уровне трех стандартных отклонений), т.е. за десяти - секундный интервал измерений установка зафиксирует 5%-ое отклонение концентрации ($\approx \pm 1 \text{ Бк/м}^3$) с достоверностью $\sim 99.7\%$. 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.

Результаты этой главы опубликованы в работах: [19], [39], [40], [41], [44], [47].

Глава 2. Связь скорости счета гамма-квантов, регистрируемых в LVD с радоном

2.1 Зависимость скорости счета гамма-квантов на LVD от концентрации радона в экспериментальном зале

В зале *A*, между башнями установки LVD, установлен радиометр радона (радонометр), который проводит точечные замеры концентрации радона по альфа-активности дочерних ядер радона. Радонометр регистрирует альфа-частицы ионизационной камерой с потоком воздуха 1.0 л/мин.

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 радонометра, полученных за период с 31 августа по 6 сентября 2003 года [64] (рис. 2.1).

На рисунке 2.1 видна задержка данных LVD относительно данных радонометра. Максимум корреляции получается при задержке данных радонометра примерно на час относительно данных LVD. Эту задержку можно объяснить, посмотрев на цепочку распадов радона: радонометр регистрирует альфа-частицы от распадов радона и полония, а LVD – гамма-кванты от висмута.

Таким образом, 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.

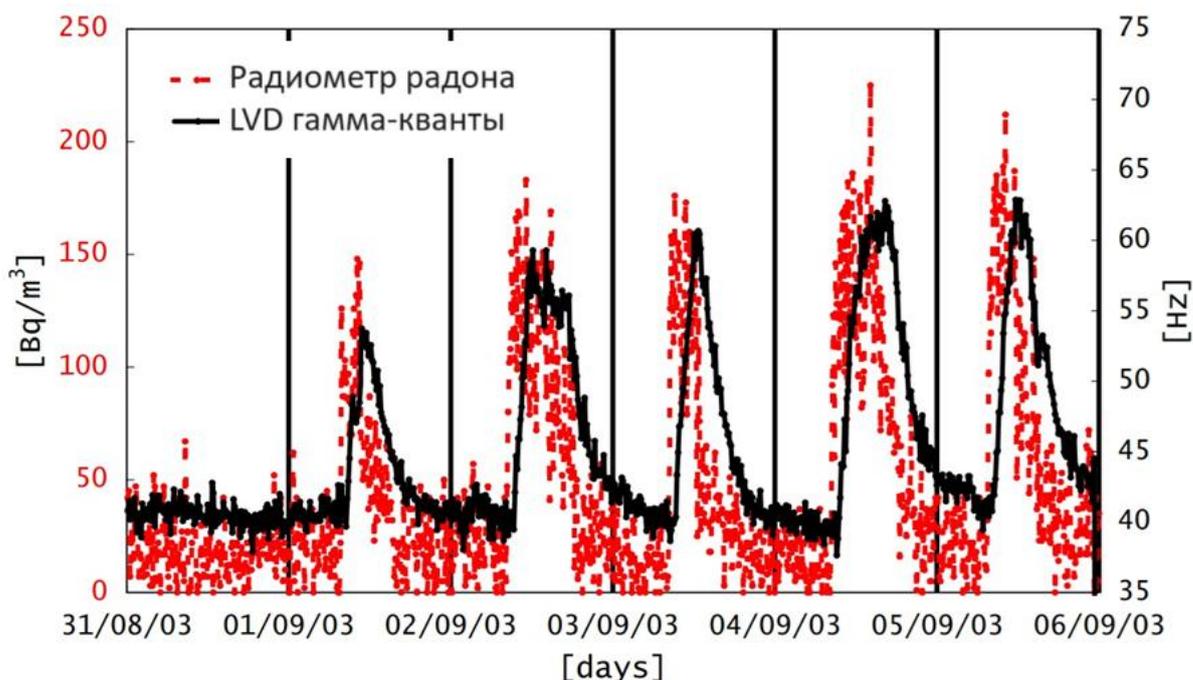


Рисунок 2.1 – Сравнение скорости счета гамма-квантов на LVD и данных радонметра.

2.2 Количественное соотношение между скоростью счета гамма-квантов на LVD и показаниями радонметра

Радонметр просматривает небольшой объем помещения и его показания сильно зависят от локальных выбросов радона. Энергия альфа-частицы при распаде радона составляет ~ 6 МэВ. Пробег альфа-частицы в воздухе всего около 4.5 см. Показания радонметра имеют очень большой разброс. Но с помощью этих данных можно найти соотношение между возрастанием концентрации радона в подземном помещении и вызванным им увеличением скорости счета гамма-квантов на LVD. Найденное соотношение дает возможность сделать вывод о том, какая часть постоянного фона гамма-квантов обусловлена радоном.

На рисунке 2.2 приведены данные радонметра и скорости счета первой башни LVD за июль 2008 года. На графике можно выделить постоянную составляющую и переменную, в виде пика. Постоянная часть (подложка) на

радонометре равна 50 ± 20 Бк/м³. Рост концентрации радона в пике составил 300 ± 22 Бк/м³, при этом соответствующее возрастание скорости счета гамма-квантов на LVD равно 44 Hz (89 Hz – 45 Hz). Отсюда следует, что изменение концентрации радона на 300 Бк/м³ вызывает увеличение скорости счета гамма-квантов на первой башне LVD на 44 Hz. Следовательно, изменение концентрации радона в подземном зале на 6.8 ± 0.5 Бк/м³ вызывает изменение скорости счета гамма-квантов на первой башне детектора на 1 Hz.

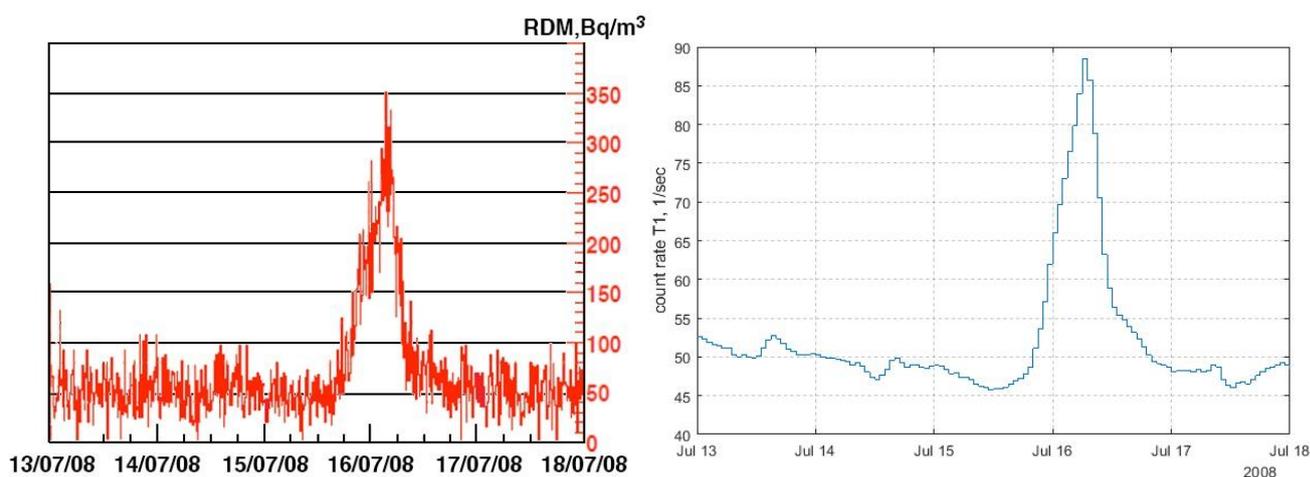


Рисунок 2.2 – Данные радонометра (слева) и скорость счета гамма-квантов на первой башне LVD (справа) с 13.07.2008 по 18.07.2008 гг.

Оценим, сколько процентов постоянного фона обусловлена радоном. Используя найденное выше соотношение между 1 Hz скорости счета LVD и концентрацией радона, получим, что при концентрации радона в помещении равной 50 Бк/м³ скорость счета гамма-квантов на первой башне LVD, обусловленная радоном равна 7.4 ± 0.6 Hz. Эта величина составляет $16 \pm 2\%$ (7.4 Hz из 45 Hz) постоянного фона гамма-квантов. Для концентрации радона равной 20 Бк/м³ скорость счета гамма-квантов на первой башне LVD, обусловленная радоном будет равна 2.9 ± 0.2 Hz, что соответствует $7.1 \pm 0.5\%$ (2.9 Hz из 40.6 Hz) постоянного фона гамма-квантов.

Используя описанный выше метод на примере данных за 2008 год, можно найти такое же соотношение данных для других периодов. На рисунке 2.1

приведены данные за сентябрь 2003 года. В данном случае зафиксированы несколько пиковых возрастных концентраций радона, поэтому для повышения точности вычисления получены соотношения, усредненные по пяти пикам. За этот период 1 Hz скорости счета на LVD соответствует повышению концентрации радона в помещении на 8.9 ± 0.5 Бк/м³. При концентрации радона 20 Бк/м³ скорость счета гамма-квантов на первой башне LVD, обусловленная радоном составила 2.3 ± 0.2 Hz, что соответствует $5.3 \pm 0.5\%$ (2.3 Hz из 43 Hz) постоянного фона гамма-квантов. При концентрации радона 50 Бк/м³ скорость счета гамма-квантов на первой башне LVD, обусловленная радоном будет равна 5.6 ± 0.3 Hz, что соответствует $12.1 \pm 0.7\%$ (5.6 Hz из 46.4 Hz) постоянного фона гамма-квантов.

Таким образом, получены вычисленные по экспериментальным данным усредненные соотношения. Увеличение на 1 Hz скорости счета на первой башне LVD соответствует повышению концентрации радона в помещении на 1 Hz = 7.9 ± 0.5 Бк/м³. При концентрации радона в помещении равной 20 Бк/м³ на установке LVD будет зарегистрировано в среднем 2.6 ± 0.2 отсчета, обусловленных радоном, что составляет $6.2 \pm 0.5\%$ от общей скорости счета гамма-квантов на LVD. При концентрации радона в помещении равной 50 Бк/м³ на установке LVD будет зарегистрировано в среднем 6.5 ± 0.7 отсчета, обусловленных радоном, что составляет порядка $14 \pm 2\%$ от общей скорости счета гамма-квантов на LVD.

Можно сделать оценочные вычисления количества отсчетов в детекторе при известной концентрации радона в помещении. Полное число импульсов в секунду в одном счетчике: $C_{Rn} = 0.5 \times \rho_{Rn} \times (\varepsilon \times N_\gamma) \times V$, где ρ_{Rn} – концентрация радона в помещении в Бк/м³ (количество распадов ядер радона в секунду в м³); N_γ – количество гамма-квантов, образующихся в результате распада одного ядра радона; ε – полная эффективность регистрации гамма-квантов детектором; V – объем, из которого счетчик может зарегистрировать гамма-квант. На один распад ядра радона всего приходится 1.08 гамма-квантов. Полная эффективность регистрации состоит из статистической части и части, учитывающий геометрический фактор: $\varepsilon = \varepsilon_{\text{стат}} \times \varepsilon_{\text{геом}}$. Для низких энергий эффективность

регистрации сильно зависит от статистических флуктуаций количества фотоэлектронов, вылетающих с фотокатода (см. Главу 1, п. 1.2). Эффективность регистрации зависит от энергии гамма-квантов: $\varepsilon_{\text{стат}} = \sum w_i \times \varepsilon_i$, где w_i – количество появившихся гамма-кванта с данной энергией ($\sum w_i = 1.08$), ε_i – вероятность зарегистрировать гамма-квант данной энергии. Величины ε_i определяются по экспериментально измеренной форме низкого порога для счетчиков установки LVD [58]. Используя данные из таблицы 1.4, вычислим $\varepsilon_{\text{стат}} = 0.47 \times 0.15 + 0.17 \times 0.95 + 0.17 \times 0.65 + 0.06 \times 0.8 + 0.05 \times 0.97 + 0.05 \times 0.85 + 0.05 \times 0.3 + 0.04 \times 0.85 + 0.02 \times 0.98 \approx 0.55$

Эффективность регистрации зависит не только от энергосодержания частицы, но и от координаты внутри детектора, куда помещен источник излучения. Можно учесть геометрический фактор, измеряя эффективность регистрации для частиц больших энергий, для которых уже нет влияния статистических флуктуаций количества фотоэлектронов: $\varepsilon_{\text{геом}} = 0.5$. Таким образом, полная эффективность регистрации, учитывающая количество гамма-квантов, образующихся при распаде одного ядра радона ($\varepsilon \times N_\gamma$) ≈ 0.28 . Один внутренний сцинтилляционный счетчик может регистрировать гамма-кванты низких энергий примерно из 1 м^3 воздуха, т.к. остальное пространство от таких гамма-квантов экранируется соседними счетчиками. В итоге, получаем: $C_{\text{Rn}} \approx \rho_{\text{Rn}} \times 0.14$. При концентрации радона в помещении равной 20 Бк/м^3 на установке LVD должно быть зарегистрировано примерно 2.8 импульсов в секунду на счетчик, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Для изучения вариаций фона и разделения вкладов от его различных источников в полный темп счета установки LVD с энергиями больше 0.5 МэВ было проведено Монте-Карло моделирование фоновых событий в детекторе от естественной радиоактивности грунта и материалов конструкции [65]. Для моделирования использовался программный комплекс Geant4 версии 10.3 [66]. На рисунке 2.3 показан один из результатов моделирования, представляющий отношение числа событий, обусловленных радоном в воздухе для разной

концентрации радона, к полному числу событий от всей радиоактивности, который также неплохо согласуется с представленными выше результатами.

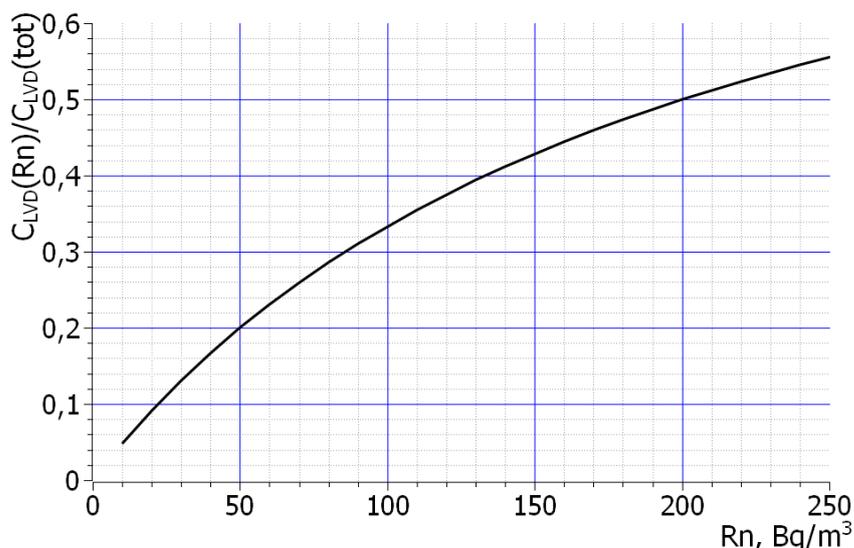


Рисунок 2.3 - Отношение числа событий, обусловленных радоном в воздухе для разной концентрации радона, к полному числу событий от всей радиоактивности.

2.3 Форма “радонового” пика на LVD

Идентификации аномальных возрастаний скорости счёта установки как “радоновых пиков” было посвящено несколько специальных измерений, которые дали возможность однозначно ассоциировать пики именно с инъекцией радона.

В одном из таких измерений через открытые ворота общей площадью 50 м² в экспериментальный зал впускался воздух из соседних неветилируемых помещений с повышенной концентрацией радона. Открывая ворота в экспериментальный зал детектора на разное время, искусственно создавали пики – быстрые возрастания скорости счёта гамма-квантов, регистрируемые LVD [19].

В процессе анализа формы искусственных пиков, показано, что она обусловлена инъекцией радона в атмосферу зала и его выдувом вентиляцией. Были определены экспериментально: продолжительность нарастания пиков,

время перемешивания воздуха в зале и время возвращения к равновесному состоянию. Рост концентрации радона при открытых воротах одновременно регистрировался радонOMETром ATMOS (Sweden), помещенным в структуру установки LVD между второй и третьей башнями. Ворота открывались три раза на фиксированное время: 1 — 22 ноября 2000 года с 13:45 до 14:15 (0.5 часа), 2 — 23 ноября 2000 года с 18:30 до 21:30 (3 часа) и 3 — 26 ноября 2000 года с 10:00 до 16:00 (6 часов). В таблице 2.1 представлены показания радонOMETра за 26.11.2000 года.

Таблица 2.1 Показания радонOMETра за 26.11.2000 г.

Время	10 ⁰⁰	10 ¹⁰	10 ²⁰	10 ³⁰	10 ⁴⁰	10 ⁵⁰	11 ⁰⁰	11 ²⁰	11 ⁴⁰
C_{Rn} , Бк/м ³	26±5	30±5	29±5	32±5	34±5	36±5	32±5	41±7	45±7
Время	12 ⁰⁰	12 ²⁵	12 ⁴⁰	15 ⁰⁶	15 ³⁰	16 ⁰⁰	16 ⁰⁵	16 ²⁸	
C_{Rn} , Бк/м ³	49±7	54±7	55±7	55±8	56±8	73±8	80±8	78±8	

Время нарастания величины скорости счета гамма-квантов (C_{LVD}) при этом составило: 3 часа — в первых двух случаях и 6 часов — в последнем (рис. 2.4).

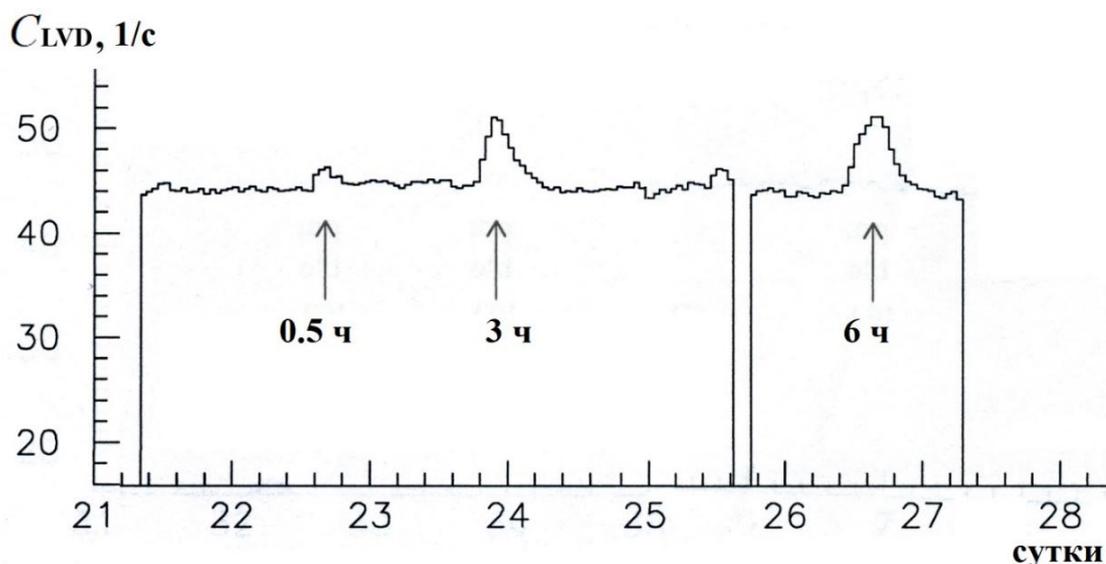


Рисунок 2.4 – Радоновые пики при открытых воротах.

Из этого эксперимента можно сделать вывод, что время перемешивания воздуха в экспериментальном зале составляет около 3 часов. Это означает, что если нарастание пика превышает 3 часа, то длительность фронта пика соответствует времени инъекции радона в атмосферу зала.

Пики имеют характерный экспоненциальный спад. Оценим величину τ_v спада, которая соответствует уменьшению концентрации радона в экспериментальном зале за счет действия вентиляции [67]. Известен поток входящего в зал воздуха: $F=8000 \text{ м}^3/\text{час}$. Вентиляция приточно-принудительная, т.е. создается за счет избыточного давления нагнетаемого наружного воздуха. Следовательно, поток выходящего воздуха равен потоку входящего. Объем зала A без оборудования $V=22000 \text{ м}^3$. Концентрацию радона для входящего воздуха будем считать незначительной. Уменьшением концентрации радона за счет распада пренебрегаем, т.к. предполагаем, что время жизни радона гораздо больше τ_v .

$C_1 = \frac{N_1}{V}$ – концентрация радона в зале в момент t_1 ;

$C_2 = \frac{N_1 - \Delta N_1}{V}$ – концентрация через время Δt в момент t_2 .

Предполагаем, что Δt мал и концентрация радона в течение этого времени постоянна, тогда $\Delta N = C_1 \times F \times \Delta t$.

Уменьшение концентрации радона в зале A за время Δt :

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{N_1 - C_1 \times F \times \Delta t}{V} - \frac{N_1}{V} = - \frac{C_1 \times F \times \Delta t}{V}$$

Устремляем $\Delta C \rightarrow dC$, $\Delta t \rightarrow dt$; тогда $\frac{dC}{C} = - \frac{F}{V} dt$. После интегрирования получим: $\ln C = - \frac{F}{V} t + \text{const}$, $\text{const} = C_0$. Окончательно, спад концентрации радона в зале имеет вид:

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{F}{V} t\right) = C_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_v}\right), \quad \text{где } \tau_v = \frac{V}{F} = \frac{22000 \text{ м}^3}{8000 \text{ м}^3/\text{час}} = 2,75 \text{ часа}$$

На рисунке 2.5а показана форма спада усредненного пика на LVD. При $t=3$ часа виден излом. Поведение кривой до излома можно объяснить совместным действием вентиляции и продолжающимся выходом радона. После излома влияние оказывает только выдув радона вентиляцией. На рисунке 2.5б показана форма спада после излома и аппроксимация функцией $y = y_0 + A_1 \exp\left(-\frac{x-x_0}{t_1}\right)$, где $t_1=3.5$ часа. Расчетная величина $\tau_{\text{ау}}$ спада радонового пика меньше полученной по экспериментальным данным. Это можно объяснить влиянием неидеального перемешивания вдуваемого воздуха в зале A из-за оборудования (LVD и других экспериментов) и небольшим сечением трубы, подводящей воздух.

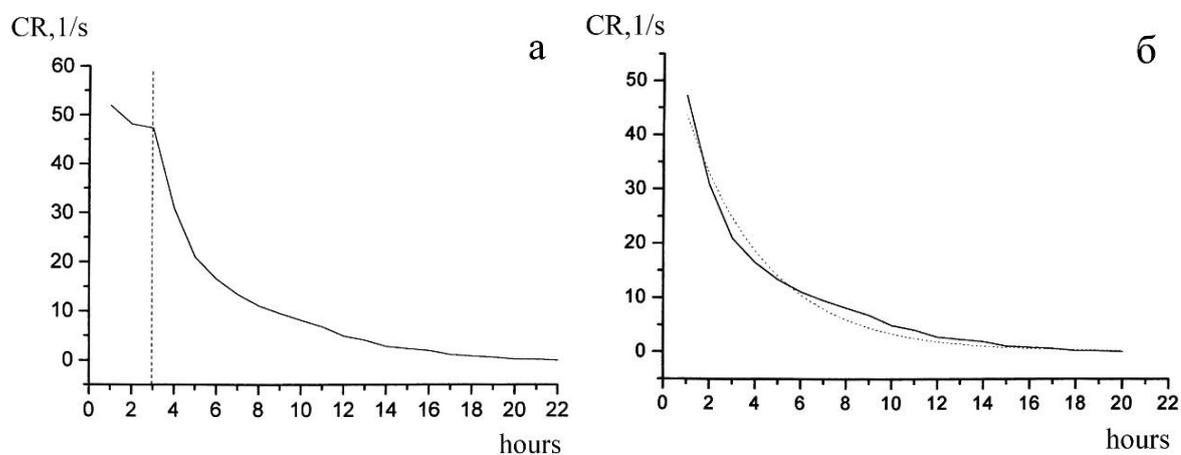


Рисунок 2.5 – Форма спада усредненного пика на LVD – а, после излома – б.

Таким образом были выделены временные характеристики аномальных вариаций величины скорости счета: время нарастания (фронт) от 3 до 10 часов и экспоненциальный спад длительностью до ~ 14 часов с показателем экспоненты $\tau \approx 3$ часа. Полученные величины гораздо меньше времени жизни радона ($\tau_{\text{Rn}} = 5.5$ суток), следовательно, форма пика обусловлена инъекцией радона в атмосферу зала и его выдувом вентиляцией. По окончании пика величина скорости счета выходит на постоянное, равновесное (между эманацией из скалы и воды, с одной стороны, и вентиляцией – с другой), значение.

2.4 Вентиляция в зале эксперимента LVD

В анализе периодических вариаций величины скорости счета LVD по нижнему порогу ($C_{LVD}(t)$) были использованы экспериментальные данные за 18 лет работы детектора с 01.01.2004 по 31.12.2021 гг. Временной ряд $C_{LVD}(t)$ представлен на рисунке 2.6 (нижняя гистограмма).

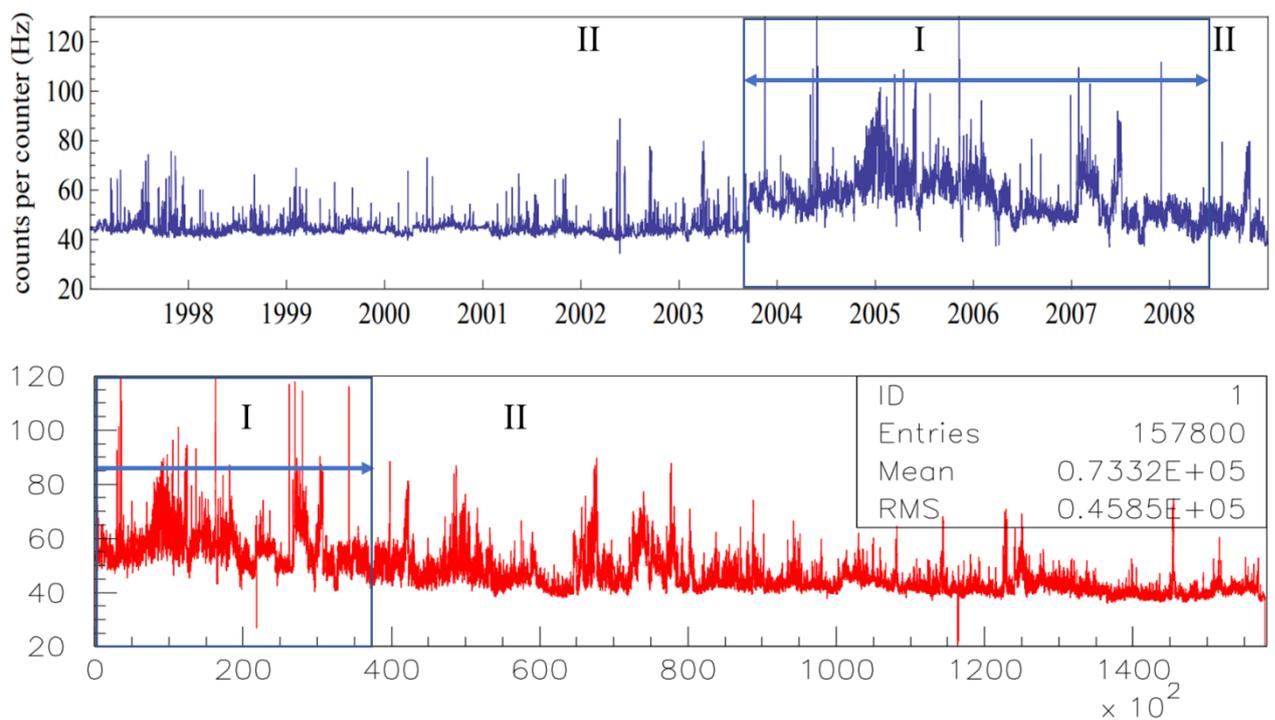


Рисунок 2.6 – Временные ряды $C_{LVD}(t)$: верхняя гистограмма [63] – данные за период с 01.01.1998 по 31.12.2008 гг., нижняя гистограмма – данные настоящей работы за период с 01.01.2004 по 31.12.2021 гг.

Можно выделить два периода работы установки, которые связаны с разной работой системы вентиляции в экспериментальном зале установки LVD (рис.2.6).

Период I [63], 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 (см. Главу 1, п. 1.1). В период I велось активное

строительство детектора Gerda, который находится рядом с LVD (в 10 метрах). В подтверждение действия вентиляции исследовали поведение суточных и недельных вариаций данных $C_{LVD}(t)$, в которых видно различную форму временных рядов экспериментальных данных, вызванную изменением режима вентиляции.

2.5 Суточные и недельные вариации скорости счета гамма-квантов на LVD

Суточные вариации $C_{LVD}(t)$ за 24 часа получены методом наложения эпох для рабочих дней с понедельника по пятницу и для выходных дней (суббота, воскресенье). Метод наложения эпох заключается в том, что данные за один и тот же час в сутках суммируются и усредняются. На рисунке 2.7 показаны примеры для 2005 года (год относится к периоду I), 2009 года (период II) и 2020 года (период пандемии). По оси абсцисс отложены часы в течение суток.

Временной ход темпа счета в 2005 году в рабочие дни имеет два минимума, которые расположены на временной шкале около 12 и 16 часов. В районе 14 часов наблюдается повышение темпа счёта (рис. 2.7а). Временной ход темпа счета в 2009 году в рабочие дни имеет два максимума, которые расположены на временной шкале около 12 и 16 часов. В районе 14 часов наблюдается снижение темпа счёта (рис. 2.7в). Максимум вариации составляет 6.7%.

В выходные дни (суббота и воскресенье) для всех годов темп счёта фоновых событий имеет другой вид: отсутствуют выраженные максимумы и не наблюдается увеличение темпа счёта в рабочее время (рис. 2.7б, г).

Заметим, что в годы пандемии Ковид-19 (2020 и 2021 гг.) (рис. 2.7д, е) суточного хода вариаций $C_{LVD}(t)$ почти нет (<1%).

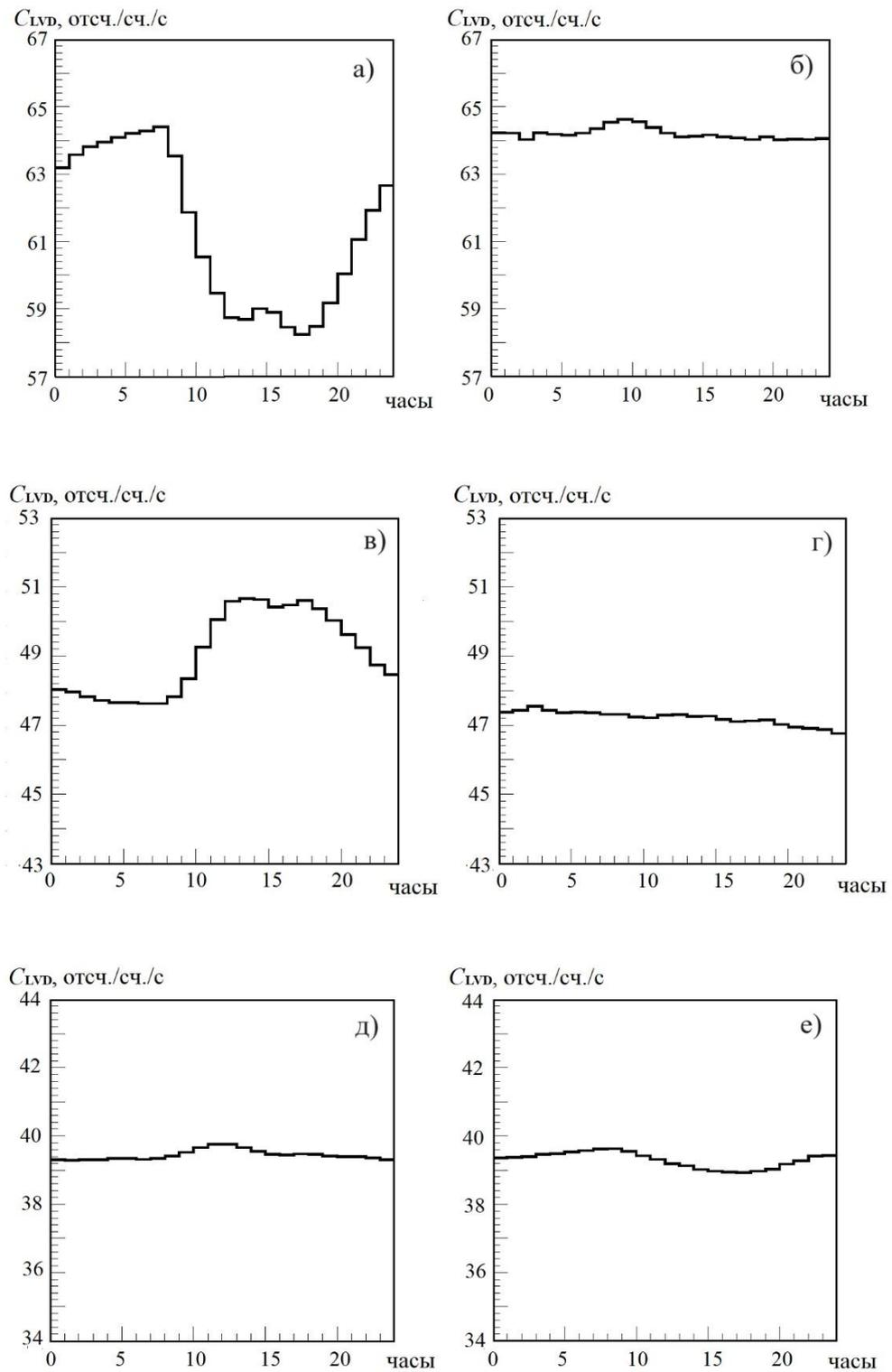


Рисунок 2.7 – Суточные вариации $C_{LVD}(t)$, полученные методом наложения эпох, где эпоха 24 часа, для 2005 года (а – для рабочих дней, б – для выходных), для 2009 года (в – для рабочих дней, г – для выходных), для 2020 года – года пандемии Ковид-19 – (д – для рабочих дней, е – для выходных).

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 приточной вентиляции, при закрытых воротах концентрация радона в зале достаточно низкая и составляет ≈ 26 Бк/м³. 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.

На рисунке 2.8 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. На рисунке показаны характерные примеры за 2005, 2009, 2013 и 2020 годы. По оси абсцисс отложены часы с начала недели. Во все годы, кроме 2020, хорошо видны суточные вариации концентрации радона в экспериментальном зале в течение рабочей недели.

Рис.2.8а показывает режим работы вентиляции в период I. Можно заметить, что в ночные часы концентрация радона растет, в течении рабочего дня падает, вечером опять начинает расти; в выходные дни концентрация остается на высоком «ночном» уровне. Режим работы вентиляции периода II показан на рис. 2.8б, в. На гистограммах видны дневные увеличения концентрации радона и падение к ночи; в выходные дни наблюдается низкая концентрация на уровне «ночных» значений.

На рисунке 2.8г представлен 2020 – год пандемии. Из-за ограничений, связанных с Ковид-19 был запрет работы на экспериментах в подземной Лаборатории, кроме обязательных мероприятий. Средняя разница между дневным и ночным темпом счета в 2020 году меньше обычной и составляет примерно 2%, в то время как в 2009 и 2013 годах порядка 7% и 5%, соответственно. Объяснить

это поведение концентрации $C_{LVD}(t)$, вместе с работой приточной вентиляции, можно: 1) открыванием и закрыванием дверей на длительное время $\sim 1-3$ часов, для работы техники (подвоз оборудования и материалов); 2) движением транспорта в туннеле рядом с подземной лабораторией, так как в выходные дни почти нет движения большегрузных машин. Подобные эффекты в туннелях и подземных залах были описаны в работах [68] и [69, 70].

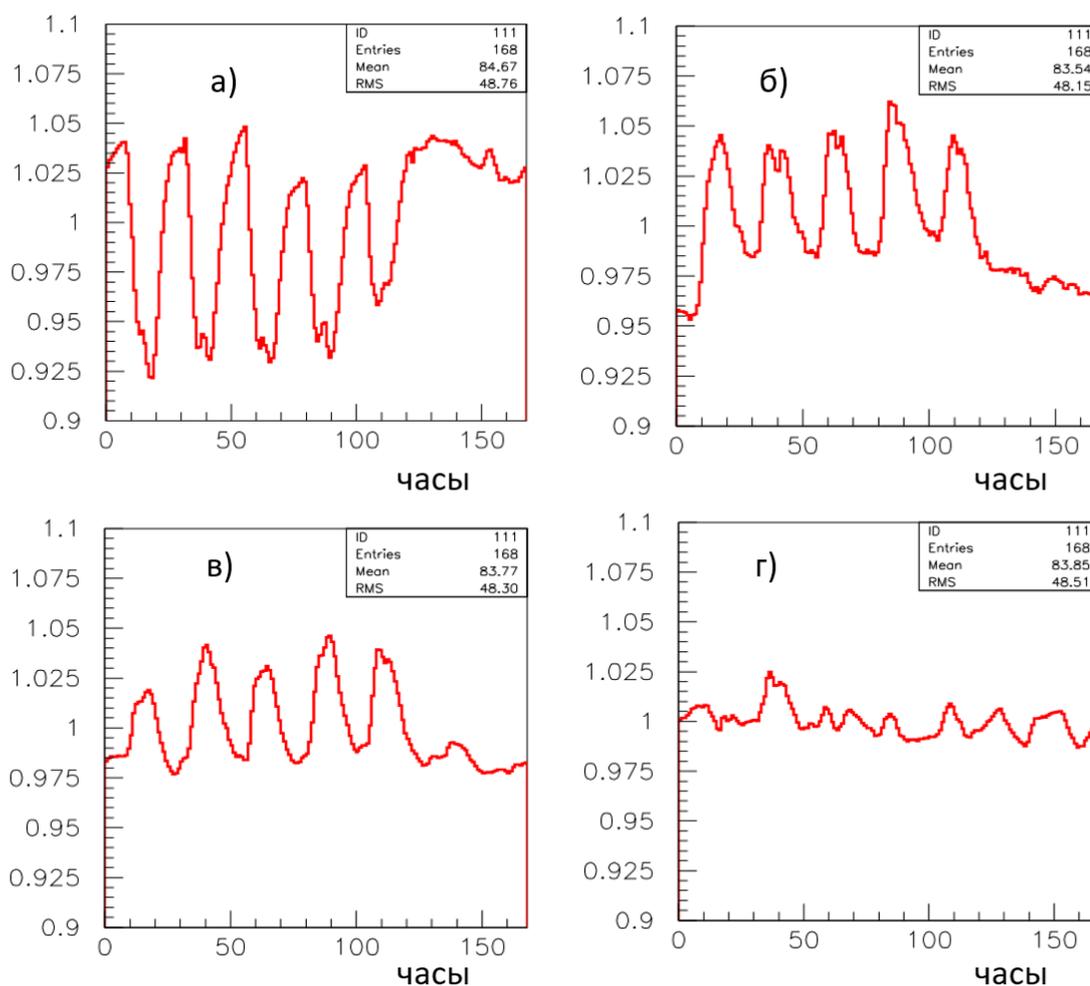


Рисунок 2.8 – Недельные вариации C_{LVD} за 2005, 2009, 2013 и 2020 гг., полученные методом наложения эпох (эпоха – 1 неделя = 168 часов).

Подтверждением техногенного происхождения суточных вариаций $C_{LVD}(t)$ является часовой сдвиг между распределениями летних и зимних периодов в данных за сутки (рис.2.9 а–г) [19].

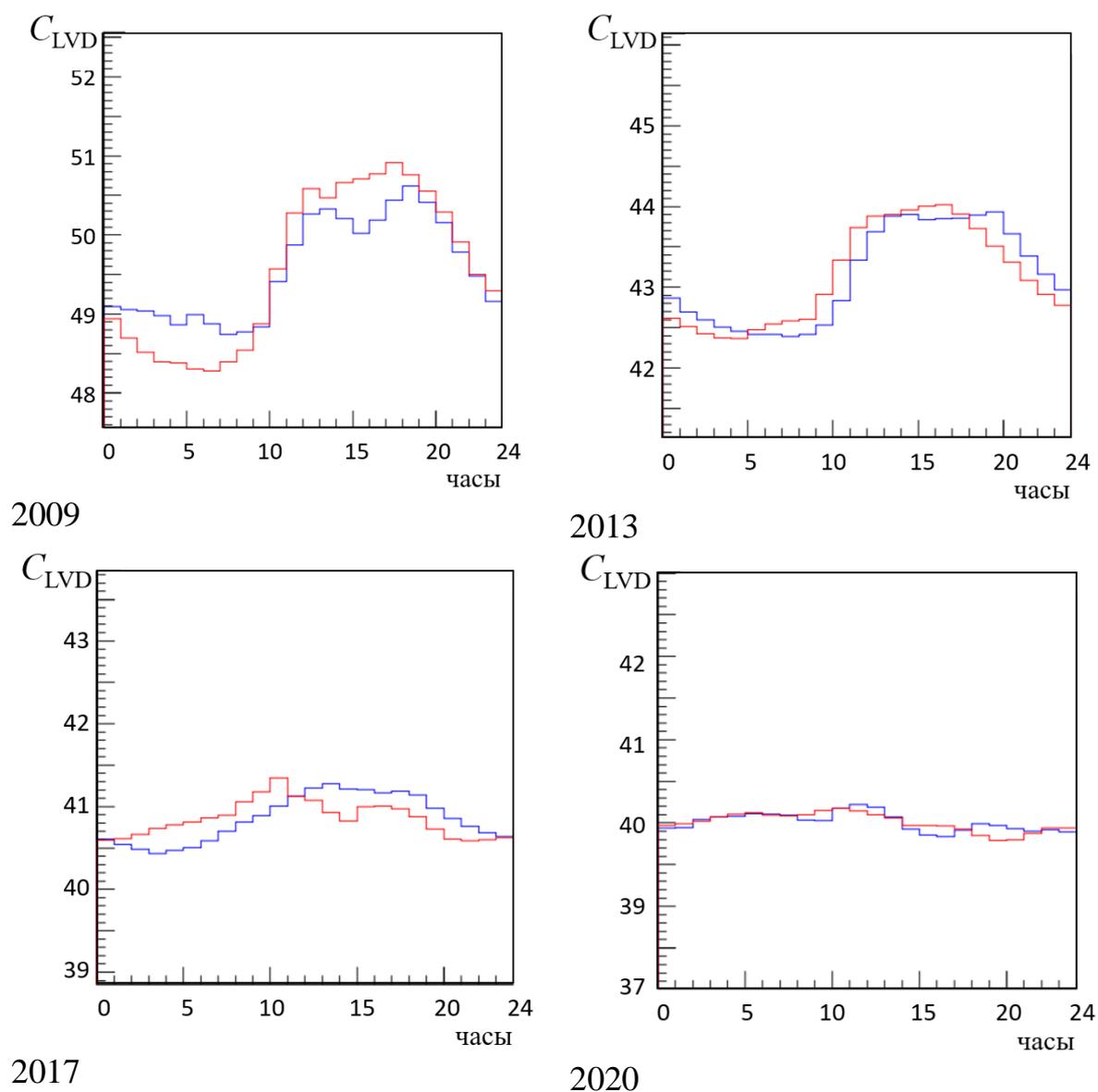


Рисунок 2.9 – Суточные вариации $C_{LVD}(t)$, полученные методом наложения эпох, для летних и зимних месяцев.

Летние месяцы в анализе – апрель, май, июнь, июль, август; зимние – ноябрь, декабрь, январь, февраль. Этот сдвиг объясняется часовой разницей летнего и зимнего времени (часы установки всегда показывают “зимнее” время, а начало рабочего дня смещается). Стрелки часов в Италии переводятся в последнее воскресенье марта на летнее время, и в последнее воскресенье октября – на зимнее время. Для удобства сравнения на рисунках (рис.2.9 а–г) средняя величина зимнего периода данных нормирована на среднее значение для летнего, т.к. величина скорости счета $C_{LVD}(t)$ зимой меньше (летом больше) на 3%

относительно среднего значения (см. Главу 4, п. 4.2). Двугорбая структура сохраняется во все периоды, кроме 2020 года – года пандемии Ковид-19.

2.6 Сравнение с LSD

Детектор LSD [71] (Liquid Scintillation Detector) был сооружен сотрудниками Института ядерных исследований АН СССР (г. Москва), Институтов космогеофизики и ядерной физики Италии (г. Турин) в рамках советско–итальянского сотрудничества по нейтринной астрофизике для обнаружения всплеска нейтринного излучения, возникающего при гравитационном коллапсе ядра массивной звезды в конце ее эволюции. 23 февраля 1987 года детектором LSD впервые в истории астрофизических наблюдений был зарегистрирован нейтринный сигнал от гравитационного коллапса ядра звезды в Большом Магеллановом облаке [72], сопровождавшийся вспышкой Сверхновой SN1987A.

Монтаж установки LSD был закончен в июне 1984 года. В октябре 1984 года LSD заработал в полном объеме, с января 1985 года начался набор данных в постоянном режиме. Детектор LSD прекратил свою работу в марте 1999 г. из-за катастрофического пожара в туннеле. В 2000 году установка была демонтирована, а счетчики перевезены в Лабораторию Гран Сассо, где вошли в состав установки LVD, являющейся расширенным вариантом LSD. Детектор находился в техническом помещении (гараже) автотранспортного туннеля под Монбланом (широта $45^{\circ}51'$, долгота $6^{\circ}54'$), соединяющего Италию и Францию. Длина туннеля составляет 11 км, направление – с юга-востока на северо-запад. Установка располагалась в 3.8 км от въезда с итальянской стороны. Толщина скального грунта над LSD около 1900 м (или ~ 5200 метров водного эквивалента) подавляет интенсивность мюонов космических лучей, являющихся источником фона, на 6 порядков.

LSD имел форму прямоугольного параллелепипеда с размерами $6 \times 8 \times 5 \text{ м}^3$ (рис. 2.10) и был установлен на стальной платформе толщиной 10 см. Он состоял из 72 жидкостных сцинтилляционных счетчиков (таких же, как и в LVD) объемом $1.5 \times 1.0 \times 1.0 \text{ м}^3$ каждый с корпусом из нержавеющей стали толщиной 4 мм. Счетчики разделены на три колонны по 24 счетчика в каждой. В каждой колонне счетчики располагались по 8 штук на трех уровнях.

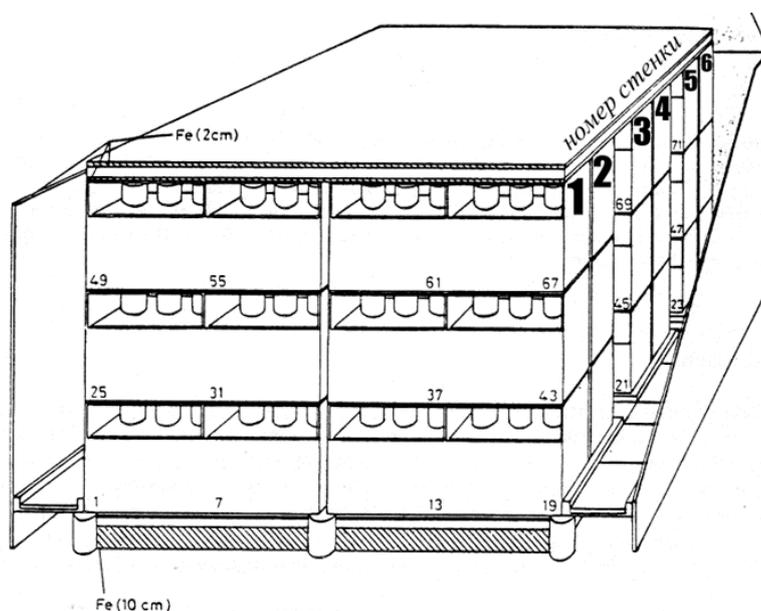


Рисунок 2.10 – Схема установки LSD.

Для подавления фона естественной радиоактивности скального грунта стенки гаража были облицованы 2-х сантиметровыми стальными листами. Счетчики находились в толстостенных (с толщиной, в среднем, 2 см) стальных контейнерах, стоящих друг над другом. Контейнеры, с одной стороны, являлись несущей структурой детектора, с другой, закрывая все грани сцинтилляционного счетчика вместе с верхней, образовывали дополнительную защиту от радиоактивности стенок гаража. Таким образом, счетчики располагались на 3-х уровнях в 6-ти стенках. Железо, наряду с жидкостным сцинтиллятором, входило в состав вещества мишени. Полная масса железа составляла ~ 200 тонн и более, чем в 2 раза превосходила массу жидкостного сцинтиллятора ($86.4 \pm 0.5 \text{ т}$). В июле 1988 г. защита установки была усилена. Детектор снаружи был окружен 25-ти

сантиметровым слоем борированного парафина и слоем свинца 2.5 см, обращенным к сцинтиллятору. Защита состояла из блоков весом около 20 кг каждый. Над установкой находилось 30 см борированного парафина и 1 см свинца, снизу – 8 см борированного парафина.

Сцинтилляционные счетчики одинаковые для установок LSD и LVD. Описание счетчика приводится в Главе 1 (п. 1.1).

Являясь одинаковыми по структуре и методу регистрации, установки LSD и LVD отличаются фоновыми условиями и количеством счетчиков, из которых они состоят. Данные установки LSD также представляются в виде суммарной по всем стабильно работающим счетчикам скорости счета в секунду, нормированной на один счетчик [67]. При анализе не использовалось разделение на внутренние и наружные счетчики. Были построены распределения скорости счета отдельно по каждому счетчику установки. В результате были полностью исключены из анализа восемь счетчиков, нестабильно работающие в течение длительного времени, а также определены границы величины скорости счета стабильно работающих счетчиков. Они должны попадать в интервал от 0.1 имп./сек до 1000 имп./сек. Таким образом, количество счетчиков, дающих вклад в общую скорость счета установки, разное в каждом измерении. Их количество на LSD варьируется от 60 до 64.

Данные LVD и LSD приведены к единому формату, что дает возможность сравнивать их между собой. На рисунке 2.11 представлена скорость счета установок LVD и LSD по низкому порогу за 1997 год. Данные усреднены по часу и приведены в виде Гц/счетчик. По оси абсцисс отложены часы с начала года. Установки расположены в разных горных массивах и имеют разные фоновые условия.

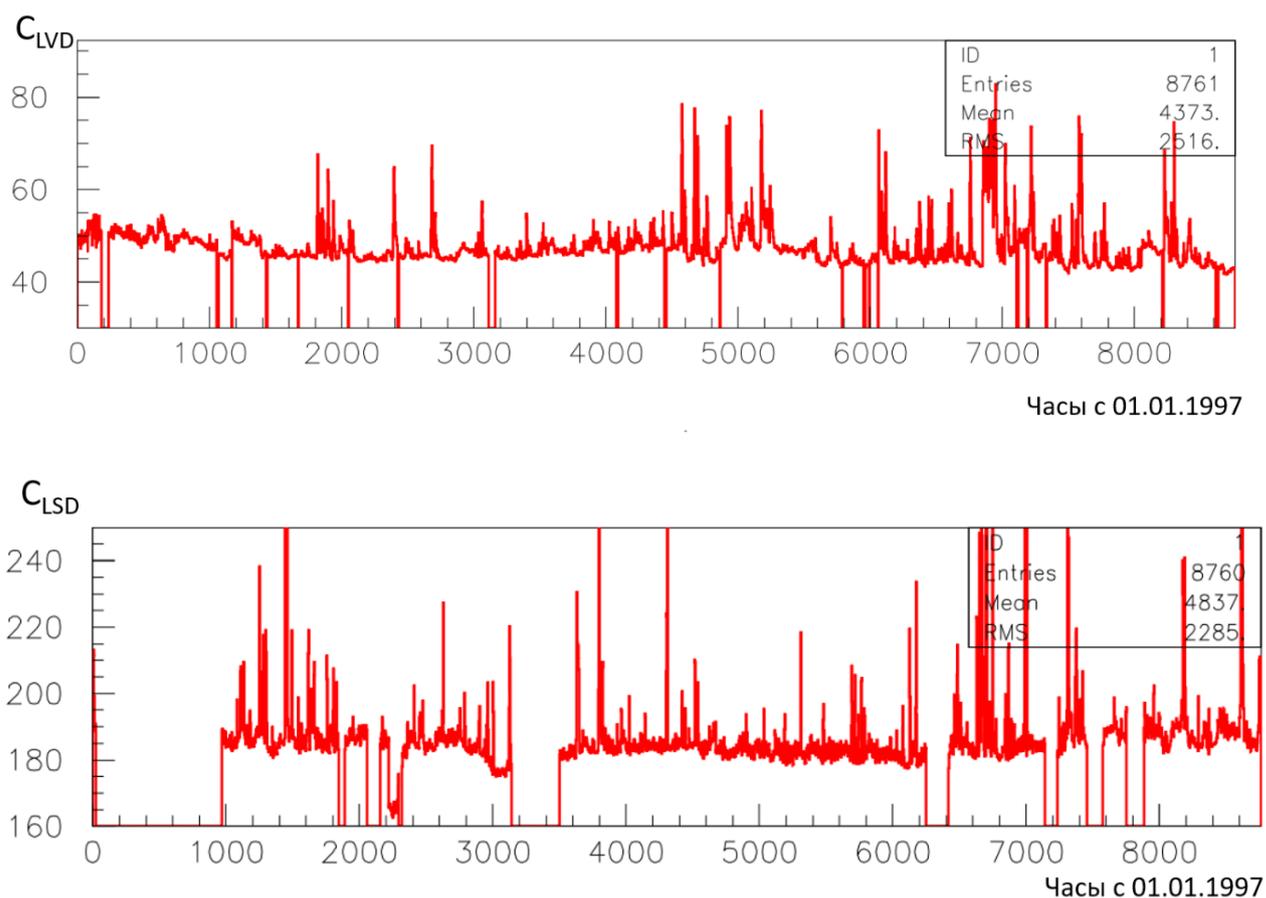


Рисунок 2.11 – Скорость счета установок LVD (верхняя панель) и LSD (нижняя панель) по низкому порогу за 1997 год.

Для обеих установок также получены суточные и недельные вариации скорости счета за 1997 год. На рисунке 2.12 слева представлена форма суточной вариации, полученная методом наложения эпох. Показана зависимость средней скорости счета от времени суток. На рисунке 2.12 справа представлены недельные вариации, также полученные методом наложения эпох. Показана зависимость средней скорости счета от дня недели. Линиями обозначены границы дней недели. По оси абсцисс отложены часы, начиная с понедельника.

В помещении установки LVD концентрация радона увеличивается в рабочее время и спадает ночью. В выходные дни она находится на постоянном “ночном” уровне. В помещении установки LSD наблюдается обратная картина: концентрация радона увеличивается в ночное время и спадает днем.

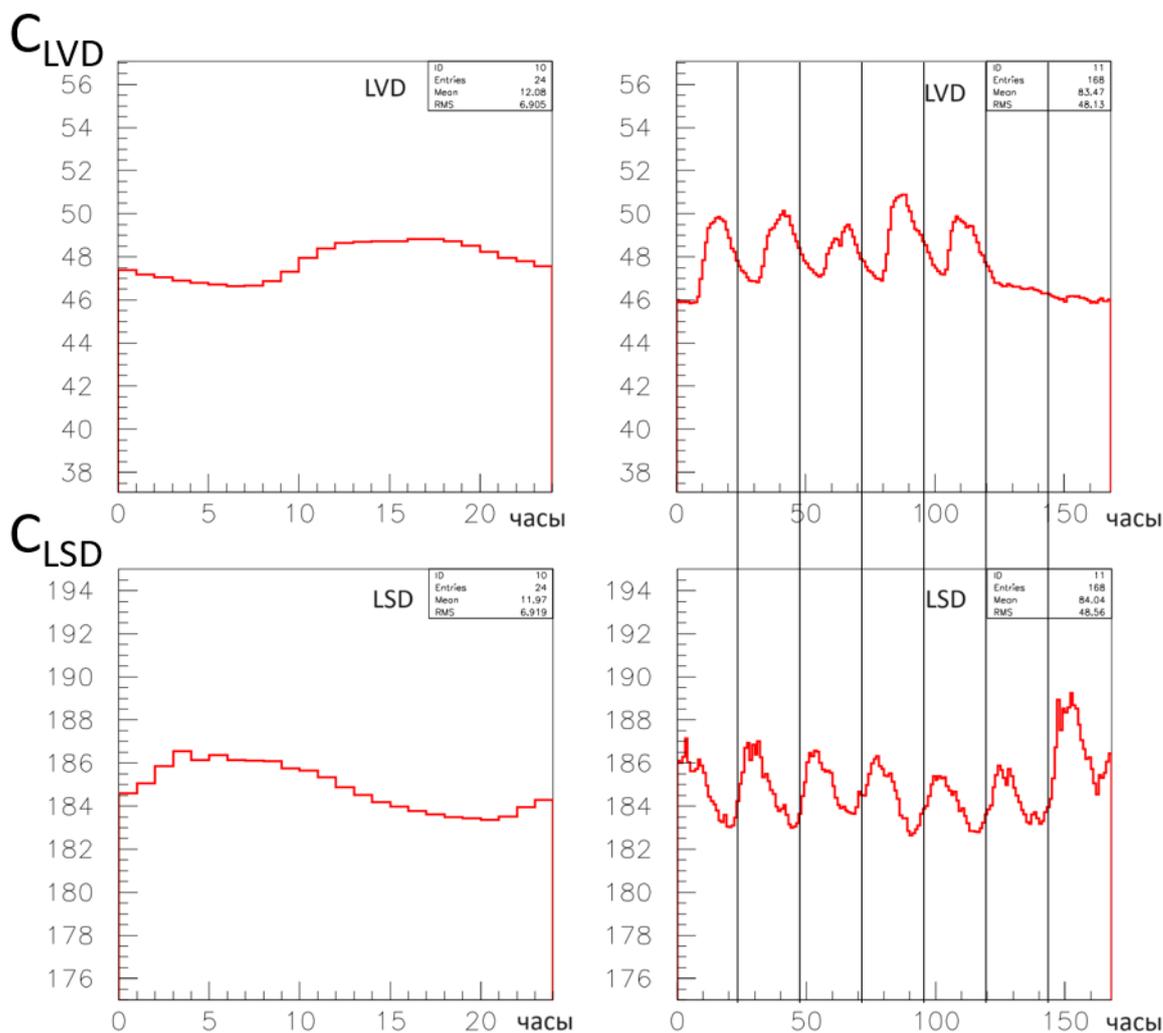


Рисунок 2.12 – Суточные (слева) и недельные (справа) вариации скорости счета установок LVD и LSD за 1997 год. Линии справа обозначают границы дней недели, начиная с понедельника.

В выходные дни виден рост концентрации (накопление), особенно в воскресенье. Картина вариаций концентрации радона в помещении установки LSD похожа на вариации, которые наблюдались в период I работы установки LVD (см. п. 2.4 и 2.5). Как было описано выше, суточные и недельные вариации имеют техногенное происхождение и в значительной мере обусловлены устройством системы вентиляции в подземном помещении. Вентиляционные системы установок принципиально отличаются друг от друга. Гараж, где находился детектор LSD отделялся от транспортного туннеля практически герметичной переборкой. Воздух в гараж подавался из туннеля через фильтры

мощным кондиционером. В отличие от экспериментального зала LVD, где работает отдельная принудительная вентиляция в непрерывном режиме, подающая чистый воздух с поверхности, вентиляция в помещении LSD, в основном, зависит от вентилирования транспортного туннеля, рядом с которым находится установка. Мощность туннельной вентиляции не постоянна и зависит от интенсивности движения транспорта по туннелю.

2.7 Выводы

Мониторинг концентрации радона в атмосфере подземного зала возможен благодаря регистрации в LVD гамма-квантов от дочерних ядер радона. Резкое увеличение скорости счета гамма-квантов связано с дополнительной инъекцией радона в атмосферу зала. Наблюдается задержка данных LVD относительно данных радонметра.

Радоновые выбросы регистрируются установками как пики на счетной характеристике фона, превышающие в максимуме средний темп счета до 2 раз. Форма “радонового” 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 тау вентиляции составляет порядка 3 часов. По окончании пика величина концентрации выходит на равновесное значение.

Проведена серия специальных измерений, которые дали возможность однозначно ассоциировать пики именно с инъекцией радона. Предложен метод нахождения соотношения между увеличением скорости счета гамма-квантов на установке LVD и повышением концентрации радона в подземном зале. При

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

Инжекция радона в атмосферу помещения происходит как непосредственно из грунта, так и из воды, которая насыщается радоном на пути через скальную породу до подземного зала, где находится установка. В подземном зале, где расположена установка LVD, имеется вентиляция, которая работает практически постоянно. Воздух для вентиляции забирается из долины. Можно выделить два периода работы установки, которые связаны с разной работой системы вентиляции в экспериментальном зале установки LVD. Период I, в который вентиляция отличалась от «обычной»: с 2004 до 2008 год. Период II со стандартной приточной вентиляцией: с 1992 по 2004 год и с 2009 года по настоящее время.

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 поведении суточных и недельных вариаций $C_{LVD}(t)$ можно увидеть отличия, обусловленные разной работой системы вентиляции. В период I 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 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 Ковид-19, концентрация радона не имела выраженных суточных вариаций оставалась на «ночном» уровне. Помимо этого, имеется часовой сдвиг между 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).

Используя разработанный алгоритм построения временных рядов скорости счета гамма-квантов, проанализированы данные установки LSD (Монблан, 1985-1999 гг.). 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: [19], [38], [39], [42], [45].

Глава 3. Связь скорости счета гамма-квантов LVD с изменением давления

3.1 Измерения температуры, влажности и давления в 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 для изучения климатических условий в подземном зале установки и их связи со скоростью счета гамма-квантов в LVD. С помощью термогигрометра ИВТМ-7 М 6-Д (ТГ) (рис. 3.1) были измерены температура (T), влажность (H) и давление (P).



Рисунок 3.1 – Измеритель влажности и температуры, одновременная индикация измеряемых значений.

Измеритель влажности и температуры ИВТМ-7 М предназначен для непрерывного (круглосуточного) измерения влажности, атмосферного давления и температуры воздуха и/или других неагрессивных газов [73]. Прибор состоит из блока измерения со встроенным датчиком давления и измерительного

преобразователя влажности и температуры. В приборе используются сенсор влажности емкостного типа для измерения относительной влажности, терморезистор для измерения температуры и резистивный тензодатчик для измерения давления. Единицы отображения влажности – % относительной влажности, температуры – °С, атмосферного давления – мм рт. ст. (автоматический пересчет из гПа, 1 гПа = 0.75008 мм рт. ст.) Основные характеристики прибора представлены в таблице 3.1. Данные, полученные от измерительного преобразователя влажности и температуры и встроенного датчика давления, записываются в энергонезависимую внутреннюю и/или внешнюю память (SD-карта) с определенным периодом. Накопленные данные находятся в файлах с расширением xls и могут быть обработаны в программе Microsoft Excel или Eksis Visual Lab. Архивные данные хранятся в файлах с именем из номера и даты закрытия файла. Данные переносятся в архивный файл при установке SD-карты в прибор. При отсутствии карты прибор ИВТМ-7 М 6-Д способен накапливать данные во внутреннюю память.

Таблица 3.1 Технические характеристики термогигрометра ИВТМ-7 М 6-Д.

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
Диапазон измерений относительной влажности, %	от 0 до 99
Пределы основной абсолютной погрешности измерения относительной влажности, %	±2.0
Диапазон измеряемых температур, °С	от -45 до +60
Абсолютная погрешность измерения температуры, °С, не более	±0.5 от -45 до -20°С ±0.2 св. -20 до +60°С
Диапазон измерений (1): Атмосферное давление, гПа Атмосферное давление, мм рт. ст.	от 840 до 1060 от 630 до 795
Пределы абсолютной погрешности измерений давления, гПа (мм рт. ст.), не более	±3 (±2.5)
Количество точек автоматической статистики	от 2097152

В I-ой серии измерений с 05.2019 г. по 10.2019 г. ТГ находился в центре детектора, на уровне $L=5$ (позиция 1 – счетчик номер N2456). Во II-ой серии с 11.2019 г. по 03.2020 г. ТГ был помещен на угол детектора LVD (позиция 2 –

N3512) на уровне $L=1$, близко к воротам из зала (рис. 3.2 и рис. 3.3). ТГ записывал измерения каждые 5 минут и хранил их на встроенной SD-карте памяти.

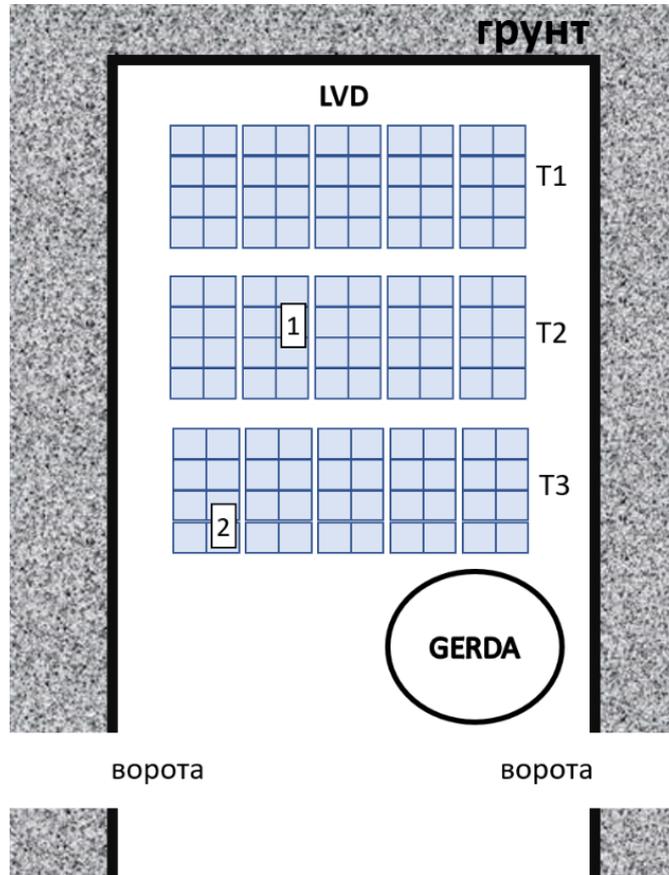


Рисунок 3.2 – Схема расположения термогигрометра в структуре LVD, вид сверху.

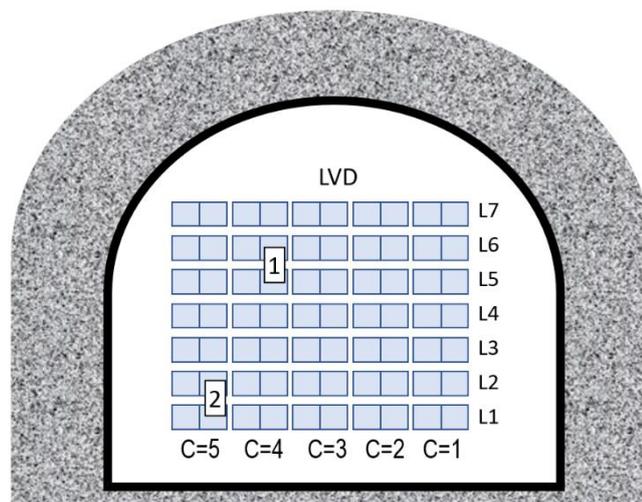


Рисунок 3.3 – Схема расположения термогигрометра в структуре LVD, вид сбоку.

Средняя температура в серии I составила 21.5 °С, в серии II – 18.5 °С (рис. 3.4). Данные группируются в зависимости от места положения ТГ. Распределение средних температур за каждый месяц показано на рисунке 3.5.

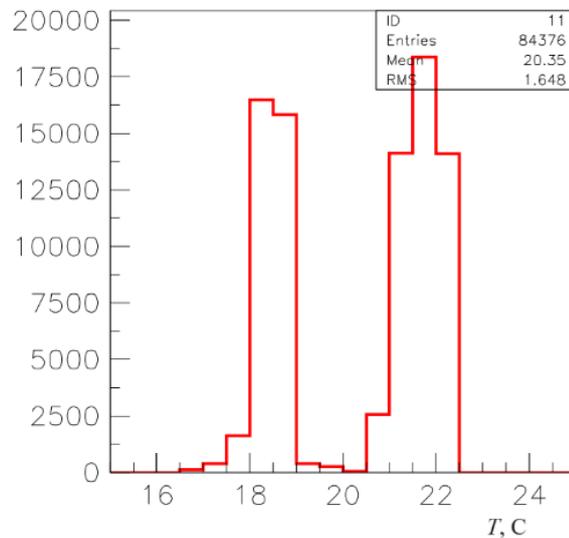


Рисунок 3.4 – Распределение температур за 2 серии измерений.

Температура воздуха зависит от высоты, на которой проводились измерения и слабо от сезона (зима-лето).

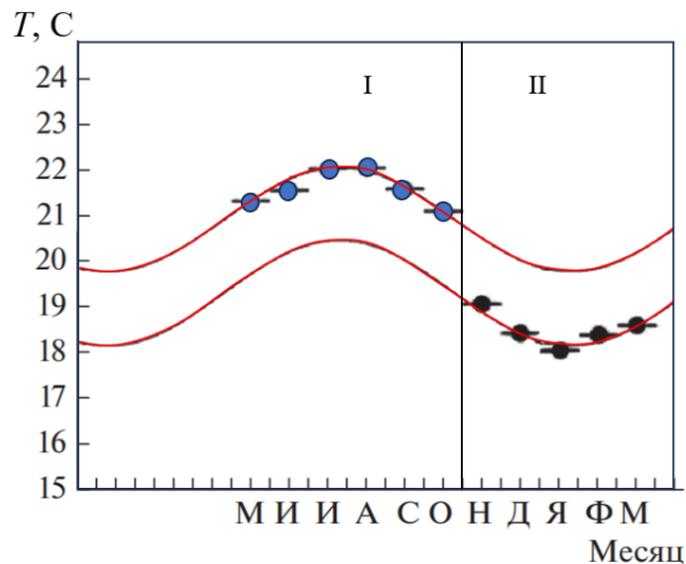


Рисунок 3.5 – Среднемесячная температура за период измерений с мая 2019 по март 2020 г., верхняя кривая – для положения ТГ на счетчике N2456, нижняя – на N3512.

Сезонная вариация среднемесячной температуры в подземном зале составляет $\delta T / \langle T \rangle = 6\%$ ($\delta T = 1.2^\circ\text{C}$). Эта величина получена при аппроксимации данных функцией вида $f(t) = \langle T \rangle + \delta T / \langle T \rangle \times \cos(2\pi(t-t_0)/12)$, где фаза – максимум в распределении $t_0 = 6.8$ мес. (рис. 3.5). Величина сезонных вариации температуры одинакова для обеих серий измерений.

Для определения зависимости температуры в зале от высоты была проведена дополнительная серия измерений. ТГ устанавливался на счетчики разных уровней с $L=1$ по $L=7$.

Средняя температура в центре детектора $\langle T \rangle = 20.0 \pm 0.2 \text{ сис}^\circ\text{C}$. Суточное изменение температуры (метод наложения эпох) составляет не более 0.1%.

На нижнем уровне детектора ($L=1$) температура, как и следовало ожидать, меньше ($18.4 \pm 0.5^\circ\text{C}$), чем средняя температура на верхнем уровне ($L=7$) – $22.3 \pm 0.3^\circ\text{C}$ (рис. 3.6). Положение башен в зале относительно выхода потока воздуха, нагнетаемого вентиляцией отражает разброс значений температуры на разных башнях ($\pm 0.5^\circ\text{C}$ относительно центральной 2-ой башни).

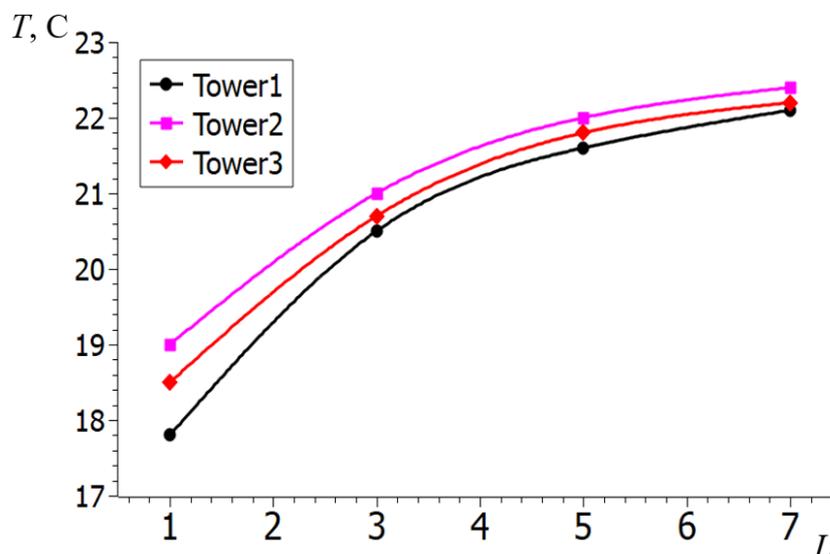


Рисунок 3.6 – Зависимость температуры от высоты

($L=1$ – нижний уровень, $L=7$ – верхний).

Зависимость измеренных температуры и влажности от высоты в подземном зале показаны в таблице 3.2.

Таблица 3.2 Измерения температуры и влажности.

Уровень	Температура, С	Влажность, %
L=1	18,5	71
L=3	20,5	65
L=5	21,9	61
L=7	22,2	60

Влажность в зале имеет достаточно большой разброс. На рисунке 3.7 приведено распределение влажности за все серии измерений. Средняя влажность в центре детектора 35.9 ± 0.1 сис %.

Средняя влажность воздуха в первой серии измерений $H(L=1) = 35\%$, в серии II - на пятом уровне - $H(L=5) = 44\%$.

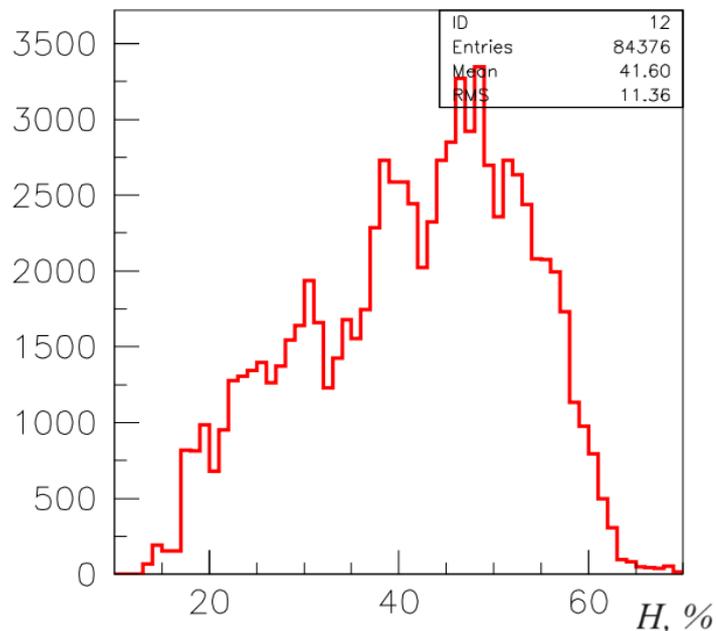


Рисунок 3.7 – Распределение величины влажности за две серии измерений.

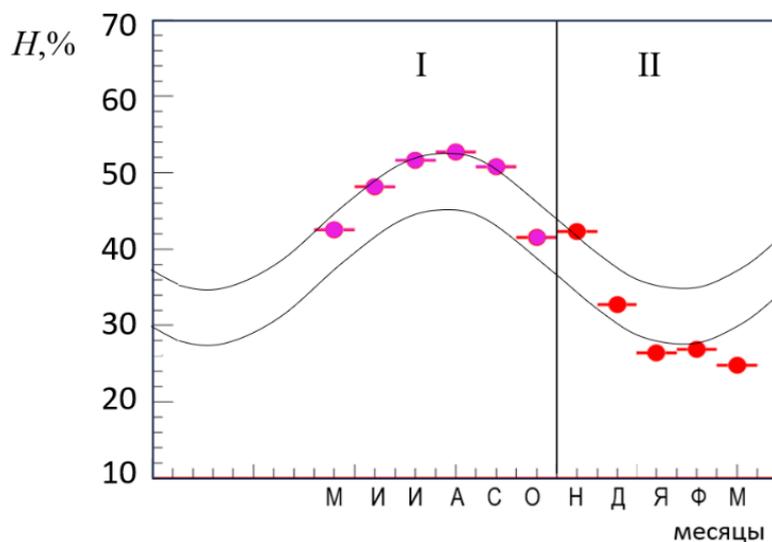


Рисунок 3.8 – Среднемесячная влажность за период измерений ТГ с мая 2019 по март 2020 года.

При фитировании функцией $f(t) = \langle H \rangle + \delta H / \langle H \rangle \times \cos(2\pi(t-t_0)/12)$ двух серий отдельно (рис. 3.8) сезонная вариация среднемесячной влажности составляет $\delta H / \langle H \rangle = 17\%$, фаза – максимум в распределении – 7.8 мес. Фаза сезонных вариаций влажности сдвинута относительно вариаций температуры. Это говорит о том, что максимум влажности приходится на время максимального насыщения грунта водой в процессе таяния снега на вершинах горного массива.

В зале детектора среднее давление за месяц практически постоянно и равно $(680 \pm 1 \text{ сис})$ мм рт. ст. (рис. 3.10). В течение года среднемесячное давление меняется на 5 мм рт. ст. Давление внутри помещения меняется на ± 20 мм рт. ст. в течение месяца (недели) (рис. 3.9), и связано с внешним атмосферным давлением (см. п. 3.3). В летние периоды атмосферное давление достаточно стабильно, а осенне-зимний период характеризуется активными циклонами и антициклонами. Поэтому мы наблюдаем сильные скачки в давлении, что подтверждается всеми метеонаблюдениями.

Все измеренные с помощью ТГ средние характеристики атмосферы в подземном зале детектора LVD приведены в таблице 3.3.

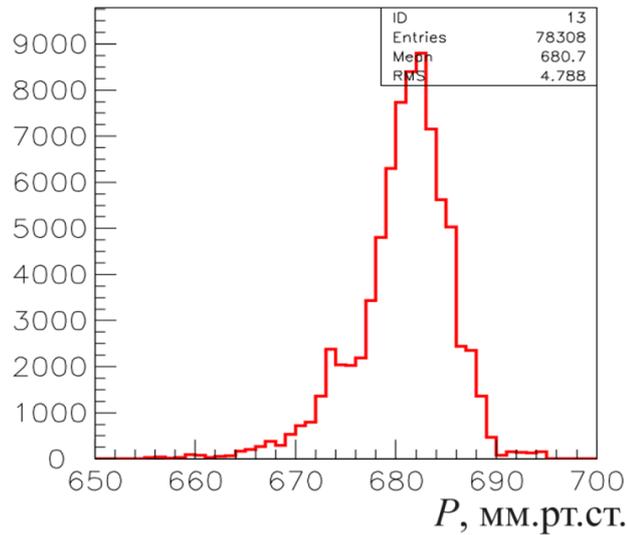


Рисунок 3.9 – Распределение величины давления, измеренной ТГ за две серии измерений.

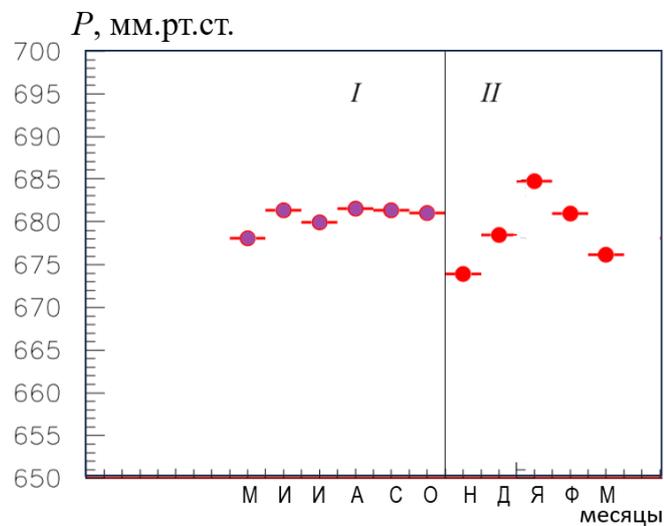


Рисунок 3.10 – Среднемесячное давление за период измерений ТГ с мая 2019 по март 2020 года.

Таблица 3.3 Средние показания T , H , P .

	Среднее значение в серии I	Среднее значение в серии II
Температура, С	18.5 ± 0.1	21.5 ± 0.1
Влажность, %	35.0 ± 0.1	44.0 ± 0.1
Давление, мм рт. ст.	682 ± 1	679 ± 1

3.2 Сравнение данных LVD и термогигрометра

В течение каждой серии наблюдений был проведен сравнительный анализ скорости счета гамма-квантов (C_{LVD}) с данными ТГ по температуре, влажности и давлению. На рисунке 3.11 приведены временные ряды данных LVD и показаний ТГ. Пики данных C_{LVD} не соответствуют пикам изменений в T, H, P .

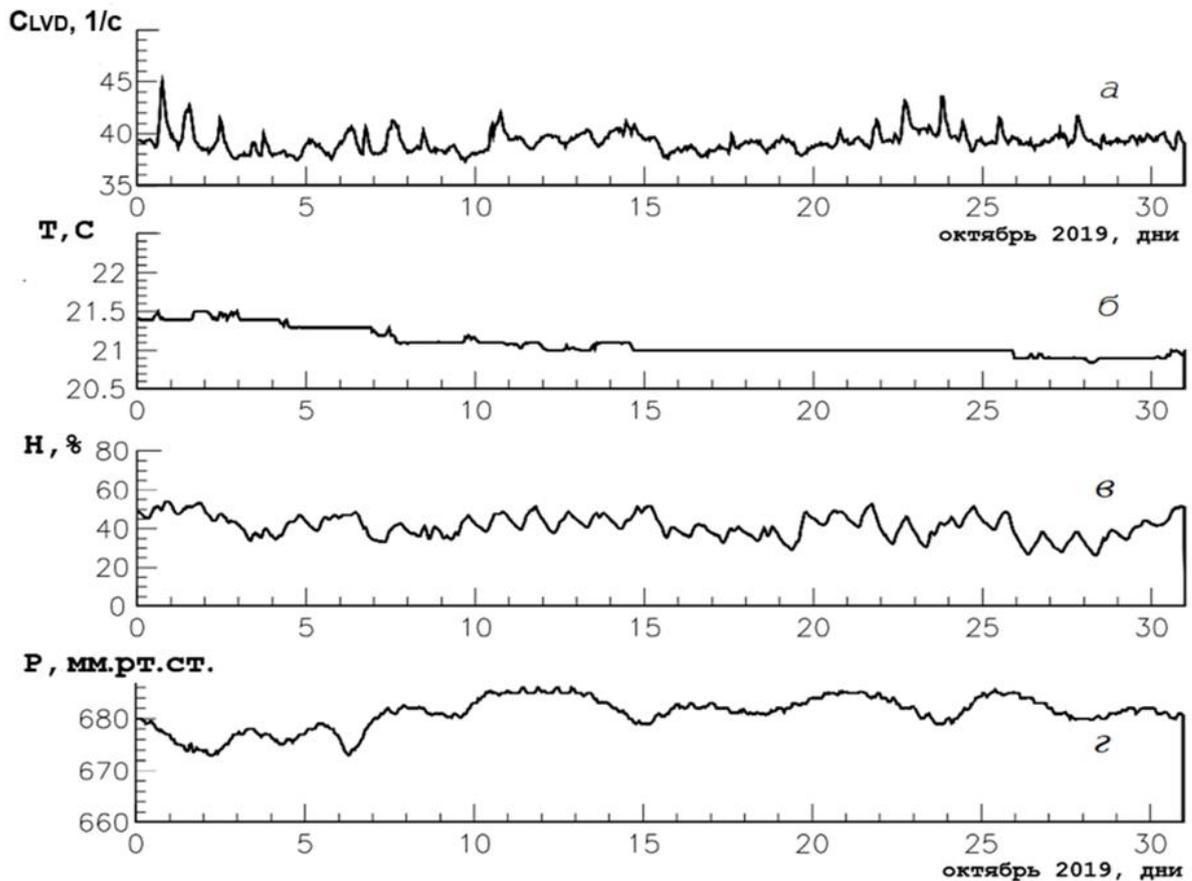


Рисунок 3.11 – Измерения за октябрь 2019 г.: *а* - скорости счета LVD (на счетчик в секунду), *б* - температуры, *в* - влажности, *г* – давления.

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 ТГ. Корреляционный анализ данных LVD с данными ТГ проводился для трех

периодов набора данных (во время непрерывной статистики, когда ТГ не переносился в разные места установки) (таблица 3.4). Для каждого периода были рассчитаны корреляционные функции для временных рядов скорости счета гамма-квантов $C_{LVD}(t)$ и данных ТГ по температуре $T(t)$, влажности $H(t)$ и давлению $P(t)$.

Более подробное описание проведенного анализа показано для пары временных рядов $C_{LVD}(t)$ и $P(t)$. Использовалась корреляционная функция:

$$K(T) = \frac{\sum_j (C_{LVD}(t) - \overline{C_{LVD}})(P(t+T) - \bar{P})}{(N-1)\sigma_{LVD}\sigma_P},$$

где $\overline{C_{LVD}} = \sum_j C_{LVD} / N$, $\bar{P} = \sum_j P / N$ – средние величины скорости счета LVD и давления P .

$\sigma_{LVD} = [\sum_j (C_{LVD} - \overline{C_{LVD}})^2 / (N-1)]^{1/2}$, $\sigma_P = [\sum_j (P - \bar{P})^2 / (N-1)]^{1/2}$ – выборочные дисперсии.

Сдвиг временного ряда давления $P(t+T)$: T от -250 до 250 часов.

Корреляционная функция позволяет не только найти коэффициент корреляции (обычно используют коэффициент Пирсона), но и найти сдвиг по времени влияния одних параметров на другие. В данном случае – выявление влияния изменения давления в экспериментальном зале на скорость счета гамма-квантов на LVD (рис. 3.12). Сдвигали данные по давлению относительно данных LVD.

Таблица 3.4 Выбранные периоды для корреляционного анализа.

Период А - 55 суток	Период В - 45 суток	Период С - 85 суток
Лето 01.06 – 25.07.2019	Осень 21.09 – 04.11.2019	Зима 06.11 – 29.01.2019
ТГ в центре детектора	ТГ в центре детектора	ТГ в углу рядом с воротами
Сдвиг: -250 ; $+250$ ч	Сдвиг: -250 ; $+250$ ч	Сдвиг: -250 ; $+250$ ч

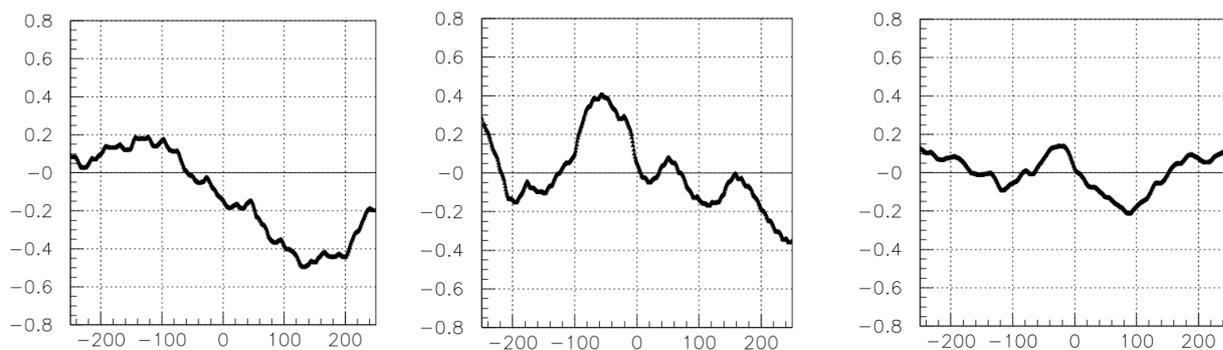


Рисунок 3.12 – Корреляционные функции для пары временных рядов $C_{LVD}(t)$ и $P(t)$.

Для летнего периода A (положения ТГ в центре) есть небольшая антикорреляция ($K = -0.5$) с давлением в районе 110 – 120 часов, что соответствует 5 суткам. Сначала изменяется скорость счета гамма-квантов на LVD, затем давление. Это можно было бы объяснить, например, тем, что давление изменилось уже где-то далеко, и это изменение вызвало изменение концентрации радона, что отразилось в данных LVD, а только потом пришел фронт измененного давления. Можно видеть по временным рядам, что типичный атмосферный циклон (антициклон) длится около 5 суток. Для осеннего периода B (положения ТГ в центре детектора) есть небольшая корреляция ($K=0.4$) с давлением в районе 56 часов. Сначала изменяется давление, и затем через 56 часов изменяется скорость счета LVD. Для зимнего периода (C) корреляций не выявлено.

Из-за противоречивости полученных результатов поиска корреляций LVD гамма-квантов с измерениями давления в зале ТГ был выполнен долговременный анализ с использованием данных атмосферного давления на поверхности.

3.3 Связь давления в подземном зале с атмосферным давлением

Был проведен сравнительный анализ хода атмосферного давления (P_{atm}) и давления в подземном экспериментальном зале (P_{hall}). Давление P_{hall} измерено с помощью термогигрометра. Давление P_{atm} взято из базы данных ERA5 [74]. ERA5 – это реанализ пятого поколения от Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) глобального климата и погоды за последние 4 – 7 десятилетий. Полный анализ данных доступен, начиная с 1979 года по настоящее время.

База данных ERA5 содержит в себе ежечасные оценки большого количества параметров атмосферы, океанских волн и поверхности суши, обновляется ежедневно с задержкой около 5 дней. Данные пересчитываются в регулярную сетку с ячейками широты и долготы по 0.25 градуса для повторного анализа и 0.5 градуса для оценки неопределенности (0.5 и 1 градус соответственно для океанских волн).

Используемый нами параметр – среднее давление на уровне моря (P_a) – представляет собой давление атмосферы у поверхности Земли, скорректированное с учетом высоты среднего уровня моря. Это мера веса, которую имел бы весь воздух в вертикальном столбе над точкой на поверхности Земли, если бы эта точка находилась на среднем уровне моря. Он рассчитывается для всех поверхностей - суши, моря и внутренних водоемов. Карты среднего давления на уровне моря используются для определения местоположения погодных систем низкого и высокого давления, часто называемых циклонами и антициклонами.

На рисунке 3.13 показано местоположение ячеек у лаборатории Гран Сассо. Красная метка – лаборатория Гран Сассо, синяя метка – ближайшая к лаборатории точка ячейки (10.3 км). С этой метки были использованы данные по давлению. Желтые метки – три оставшиеся ближайшие точки ячейки.

На рисунке 3.14 показаны временные ряды P_{atm} и P_{hall} за период мая 2019 по март 2020 года. Они повторяют друг друга и имеют очень сильную корреляцию (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0.95$). Распределение разницы

атмосферного давления и давления в зале установки LVD за вышеуказанный период представлено на рисунке 3.15. Разница давлений практически постоянна $\langle P_{\text{atm}} - P_{\text{hall}} \rangle = 82.1 \pm 1.6$ мм рт. ст.

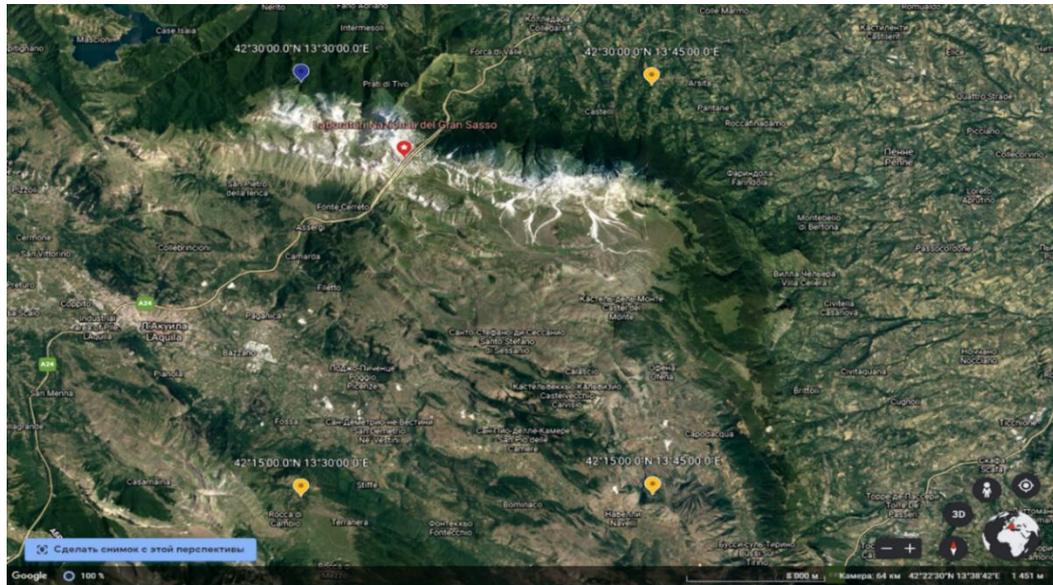


Рисунок 3.13 – Местоположение точек ячейки базы данных ERA5 у лаборатории Гран Сассо.

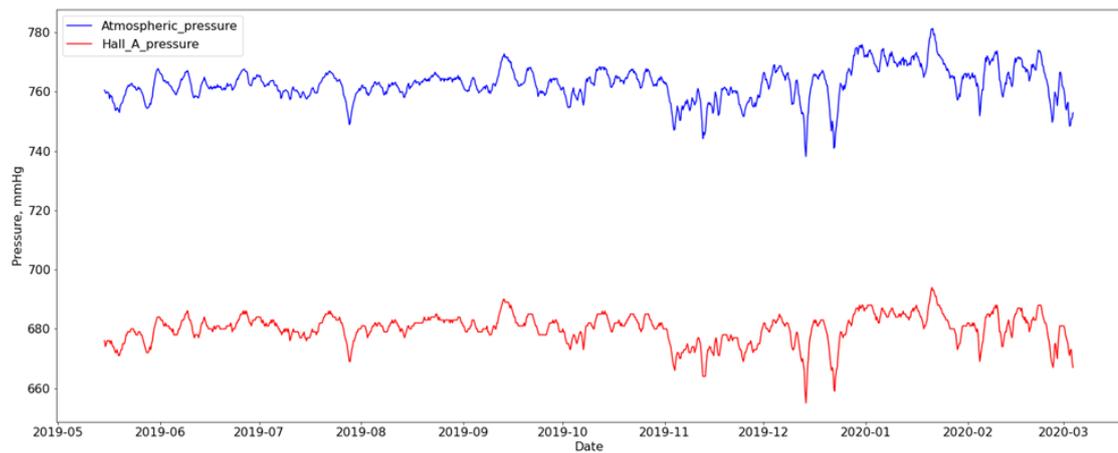


Рисунок 3.14 – Временные ряды атмосферного давления (синяя линия) и давления в зале установки LVD (красная линия).

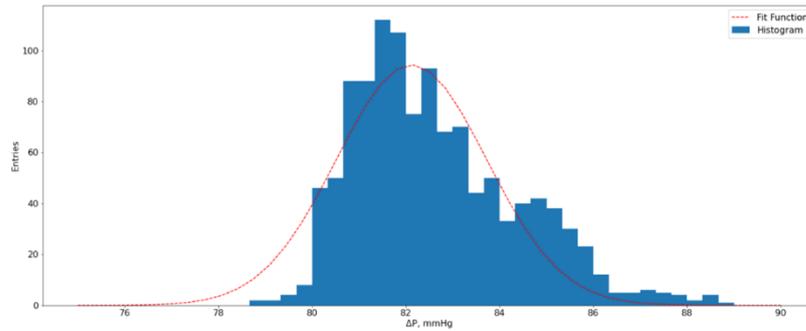


Рисунок 3.15 – Распределение разницы атмосферного давления и давления в зале установки LVD.

На рис.3.16 показан ход разницы давлений на поверхности и в зале: $\Delta P = P_{\text{atm}} - P_{\text{hall}}$. Пунктирная линия – аппроксимация гармонической функцией: $f(t) = A \times \cos(2\pi(t-\varphi)/T) + B$, где $A=2.04 \pm 0.02$, $\varphi_{\text{max}}=36.2 \pm 0.5$, $\varphi_{\text{min}}=200.6 \pm 0.5$, $T=365$, $B=82.9 \pm 0.01$. Разница давлений имеет небольшую сезонную вариацию, минимум которой приходится на конец июля, максимум – на начало февраля, и составляет порядка 2%. Такая же амплитуда и фаза вариаций для разницы $P_{\text{atm}} - P_{\text{hall}}$ получена и для других трех ближайших к Лаборатории точек базы данных ERA5.

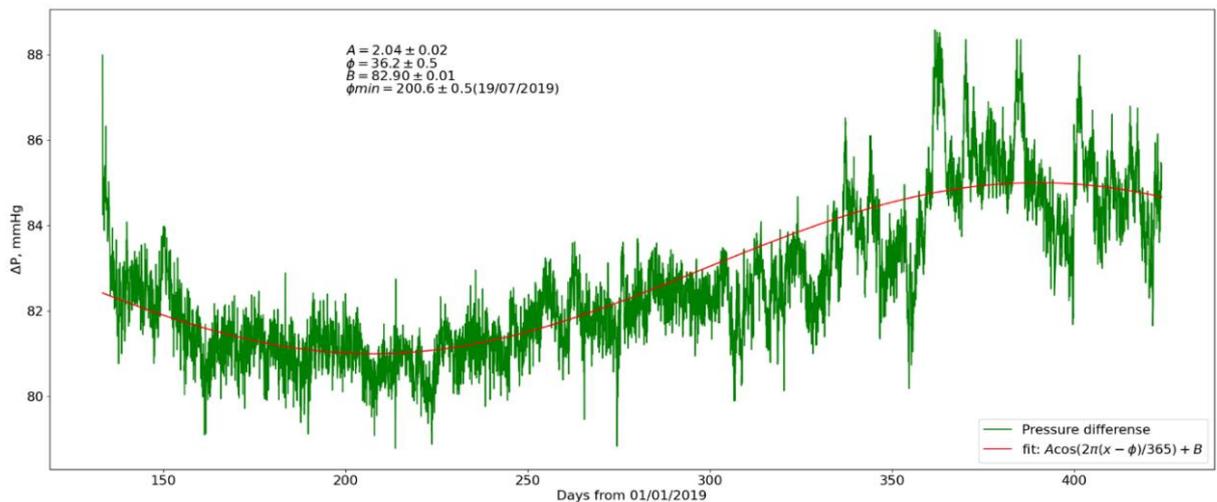


Рисунок 3.16 - Сезонный ход разницы атмосферного давления на поверхности и давления в зале LVD. Пунктирная линия – аппроксимация гармонической функцией (подробнее в тексте).

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).

3.4 Барометрический эффект на LVD

Влияние атмосферного давления на выход подземных газов и, главным образом, радона изучается уже давно. Проблемы изучения фона в подземных низкофоновых лабораториях побуждают развивать эти исследования в области физики частиц и астрофизики. На выход подземных газов влияет множество факторов: осадки, снежный покров, температура и давление и т. д. При колебаниях атмосферного давления происходит откачка подземных газов в атмосферу, и, наоборот, может происходить закачка воздуха в грунт. В некоторых работах, например, в [75, 76] изучался эффект выхода газов из грунта, в том числе радона, при понижении атмосферного давления (“пампинг-эффект” или “эффект барометрической откачки”). При этом чаще всего рассматривалось изменение давления и выход газов в одни и те же моменты времени.

В работе [36] 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 аналогичный эффект для гамма-фотонов [77], время задержки изменения числа гамма-квантов составило примерно 1 сутки.

В работе [78] 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. Заметим, что 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. В п. 3.1 были приведены измерения, показывающие, что 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 исследования барометрического пампинг-эффекта на статистике 2004 – 2022 гг. находились резкие понижения давления. Процедура заключалась в поиске локальных максимумов и минимумов во временных рядах атмосферного давления (рис. 3.17). 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.

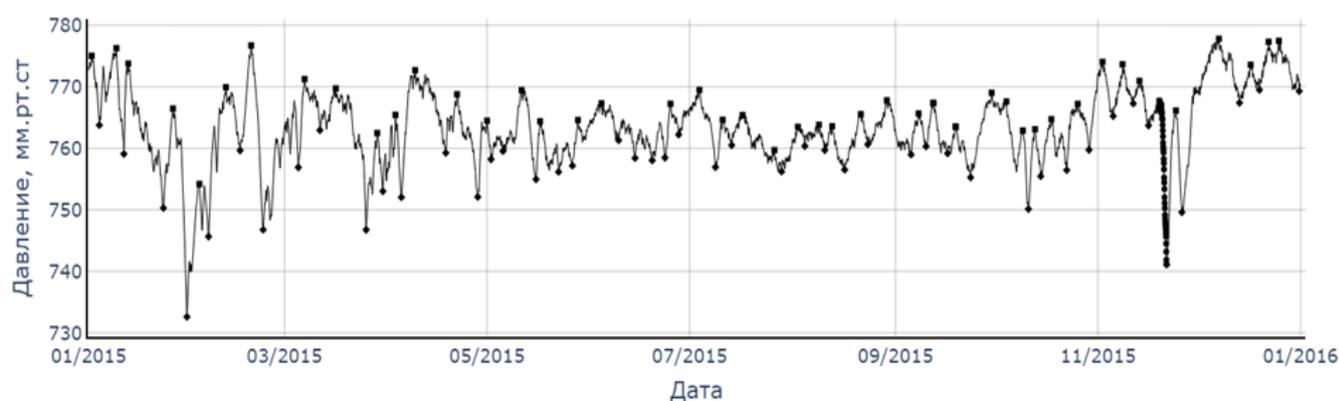
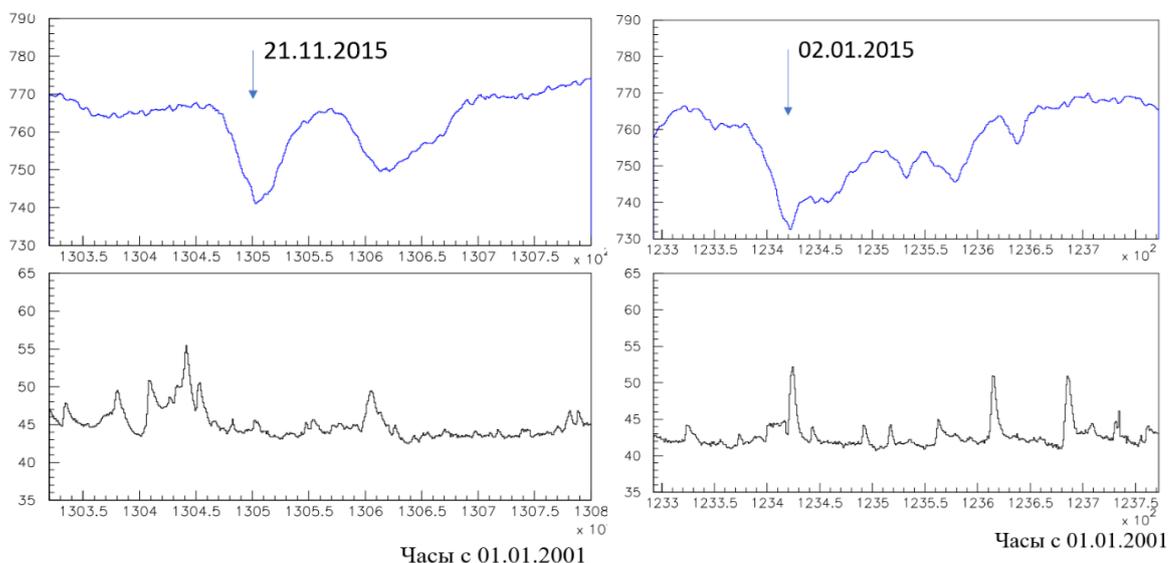


Рисунок 3.17 - Выделение на временном ряде атмосферного давления точек локальных максимумов и минимумов на примере 2015 года. Выделенные черные точки – падение давления >20 мм рт. ст. менее чем за 72 часа.

На рис. 3.18 показаны примеры выбранных резких понижений давления. Временные ряды приведены за 20 дней. Видно, что поведение временного ряда скорости счета на LVD во время резкого понижения никак не отличается от поведения в любой другой период набора данных. 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), или связано с географическим положением детектора гамма-квантов и лаборатории. Вероятно, на изменение концентрации радона больше влияет открывание ворот персоналом 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.



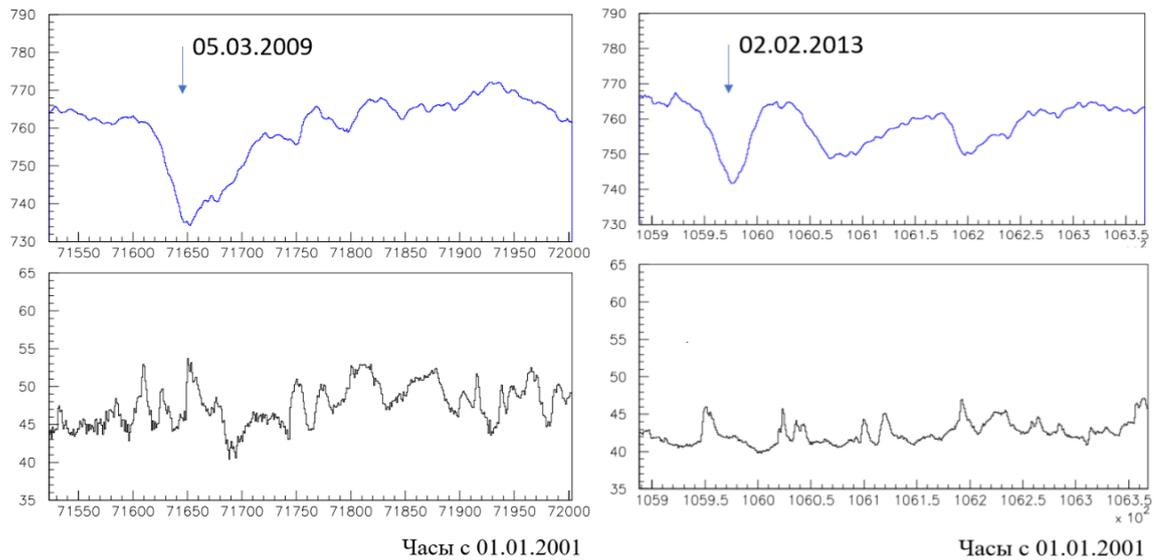


Рисунок 3.18 - Примеры выбранных резких понижений давления: синяя линия – атмосферное давление в мм рт. ст., черная гистограмма – скорость счета гамма-квантов на LVD в 1/сек.

3.5 Тренды временных рядов скорости счета гамма-квантов и атмосферного давления

Статистика детектора LVD (18 лет) 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.

На рисунке 3.19 представлены долгосрочные временные ряды атмосферного давления из базы ERA5 и скорости счета гамма-квантов LVD за период с 2009 по 2020 годы. Метод регистрации гамма-квантов LVD подробно описан в главе 1 и идентичен для трех башен детектора.

Простое вычисление коэффициента корреляции Пирсона не дает значимых значений (вычисленные значения за период 2009 – 2020 составили -0.078 , 0.051 и 0.047 для первой, второй и третьей башни соответственно). Временной сдвиг данных относительно друг друга также не приводит к увеличению значений коэффициента корреляции.

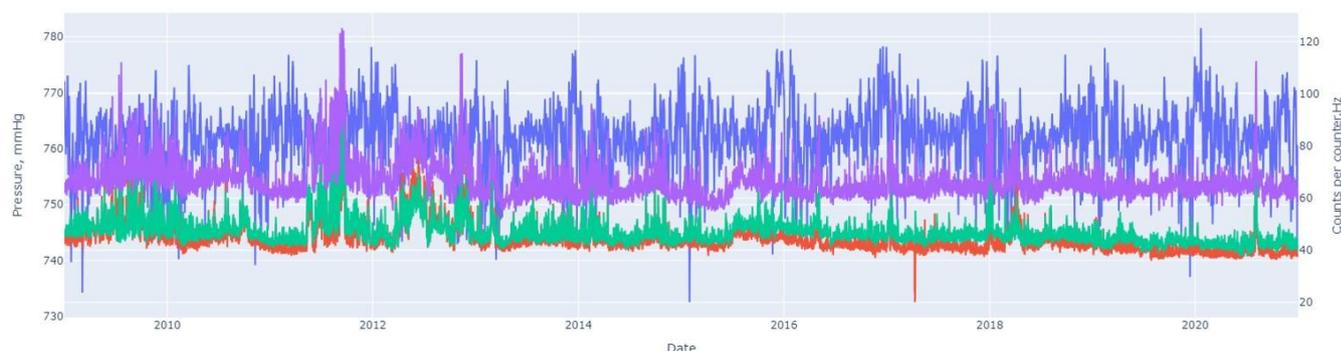


Рисунок 3.19 – Временные ряды атмосферного давления (синяя линия; значения слева) и скорости счета LVD по нижнему порогу (красная, зеленая, фиолетовая линии – для счетчиков башни 1, башни 2 и башни 3 соответственно; значения справа) за 12 лет наблюдений.

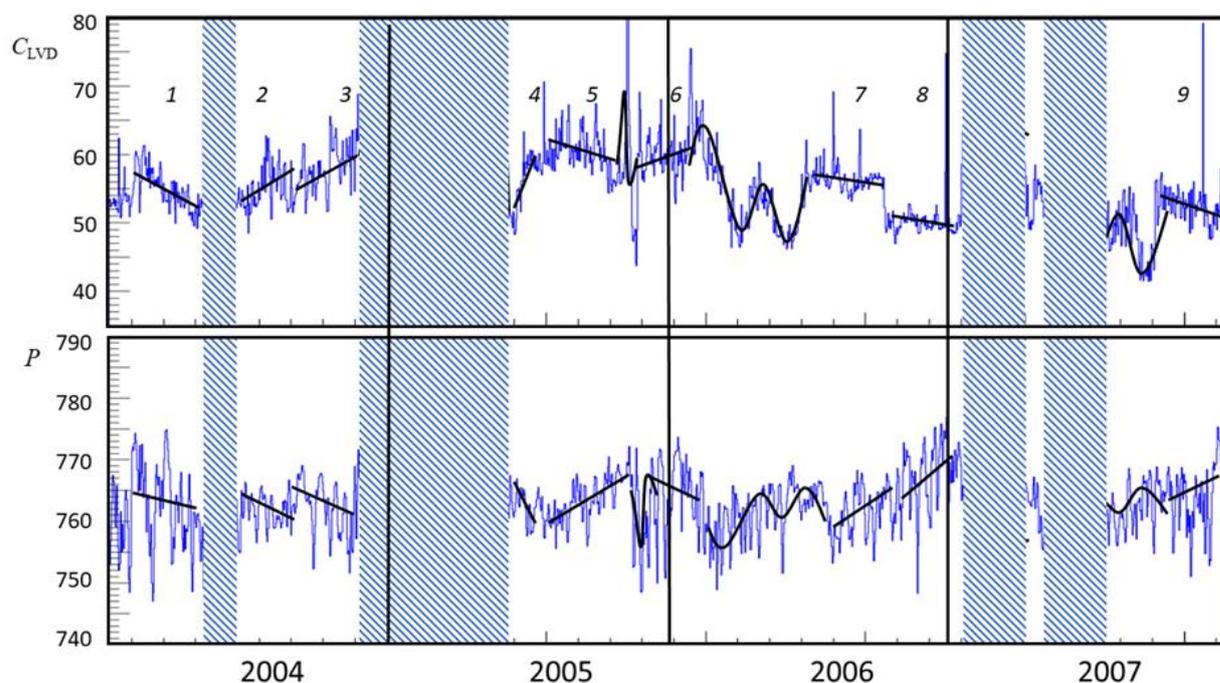
На статистике 2016 – 2020 годов впервые было замечено существование долговременных трендов изменения давления и скорости счета LVD [43]. Зависимость в поведении изменения давления и гамма-квантов наблюдается на масштабах порядка 2 – 6 мес. Можно предположить, что изменение величины атмосферного давления влияет на плавный тренд выхода радона. Тенденции (тренды) изменения показателей временного ряда давления и скорости гамма-квантов антикоррелируют друг с другом. Заметим, что поведение трендов носит не сезонный характер (рис. 3.20). Заштрихованные области – периоды с аномальными выбросами гамма-квантов (радона), связанные с работой тяжелой техники в подземном зале (строительство установок рядом с LVD) и с сильными землетрясениями.

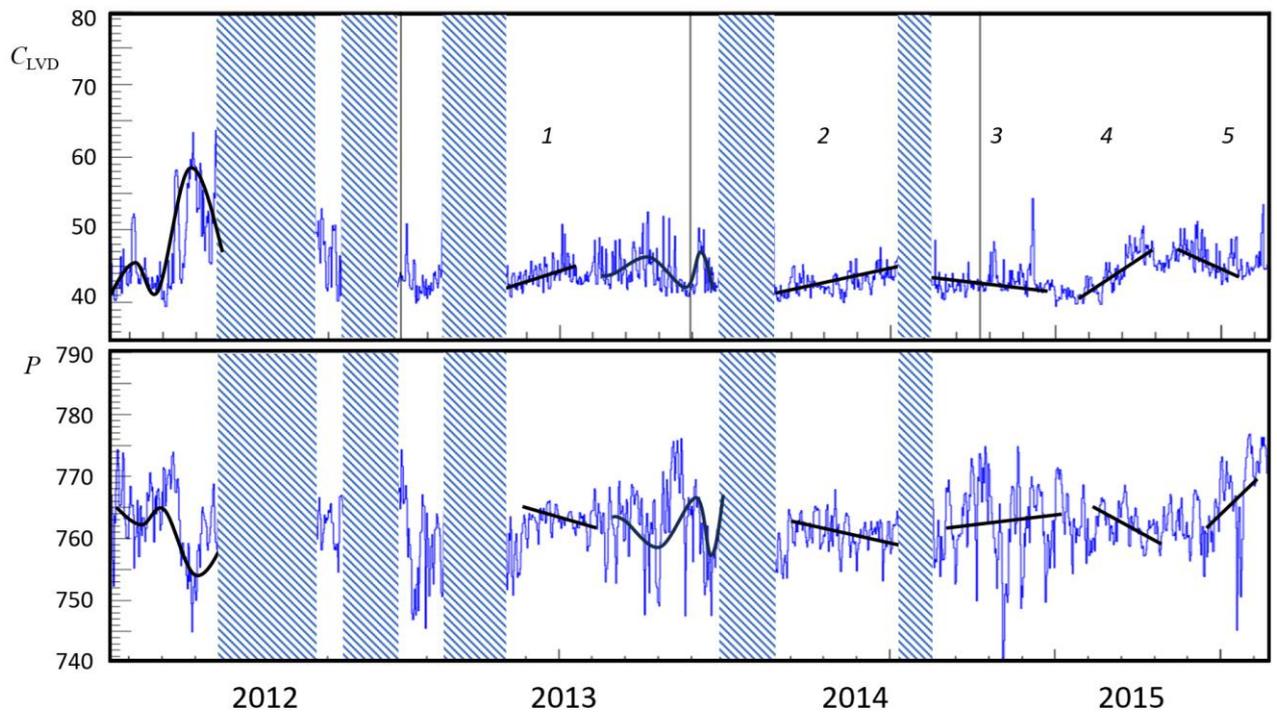
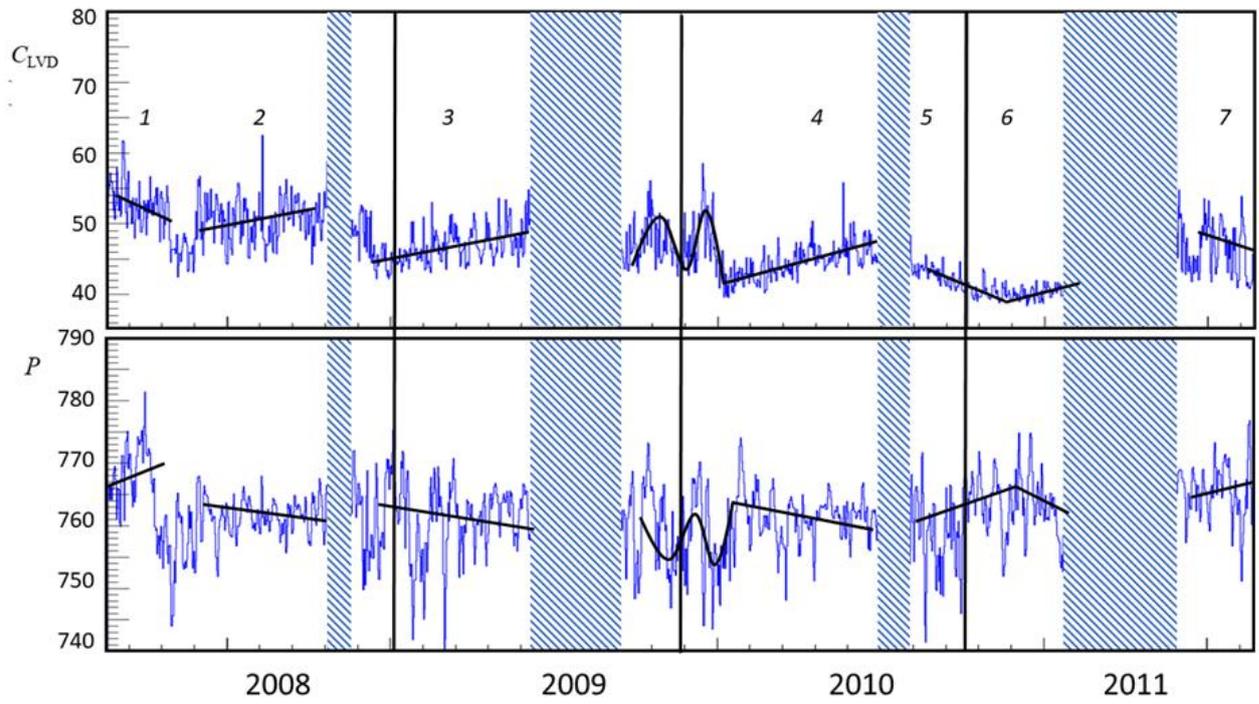
Долговременное поведение атмосферного давления в месте расположения установки LVD имеет достаточно плавный ход и небольшой разброс ($\pm 10^\circ \text{мм}^\circ \text{рт.}^\circ \text{ст.}$) относительно среднего значения – 680 мм рт. ст. в летний период. В зимние и весенние месяцы видны резкие перепады давления и большой разброс от $\pm 20^\circ \text{мм}^\circ \text{рт.}^\circ \text{ст.}$

Визуализация данных подсказывает нам, что тренды лучше моделировать кусочно-линейной функцией. За период с 2004 по 2023 гг. было выделено

несколько участков трендов (см. рис. 3.20). Аномальные выбросы на временных рядах скорости счета гамма-квантов были заштрихованы для лучшей визуализации трендов. Во временных рядах можно увидеть некоторые участки, где не только антикоррелирует тренд $C_{LVD}(t)$ и $P(t)$, но коррелирует и форма сглаженных кривых, описывающие данные (плавные кривые).

Наклоны найденных трендов для $C_{LVD}(t)$ и $P(t)$ и их длительность приведены в таблице 3.5. Ошибки определения наклонов трендов с использованием стандартной функции минимизации составляют $\sim 10\%$. За 18 лет статистики было выделено 30 трендов со средней длительностью около 4 мес. Коэффициент корреляции Пирсона между значениями наклонов равен -0.79 .





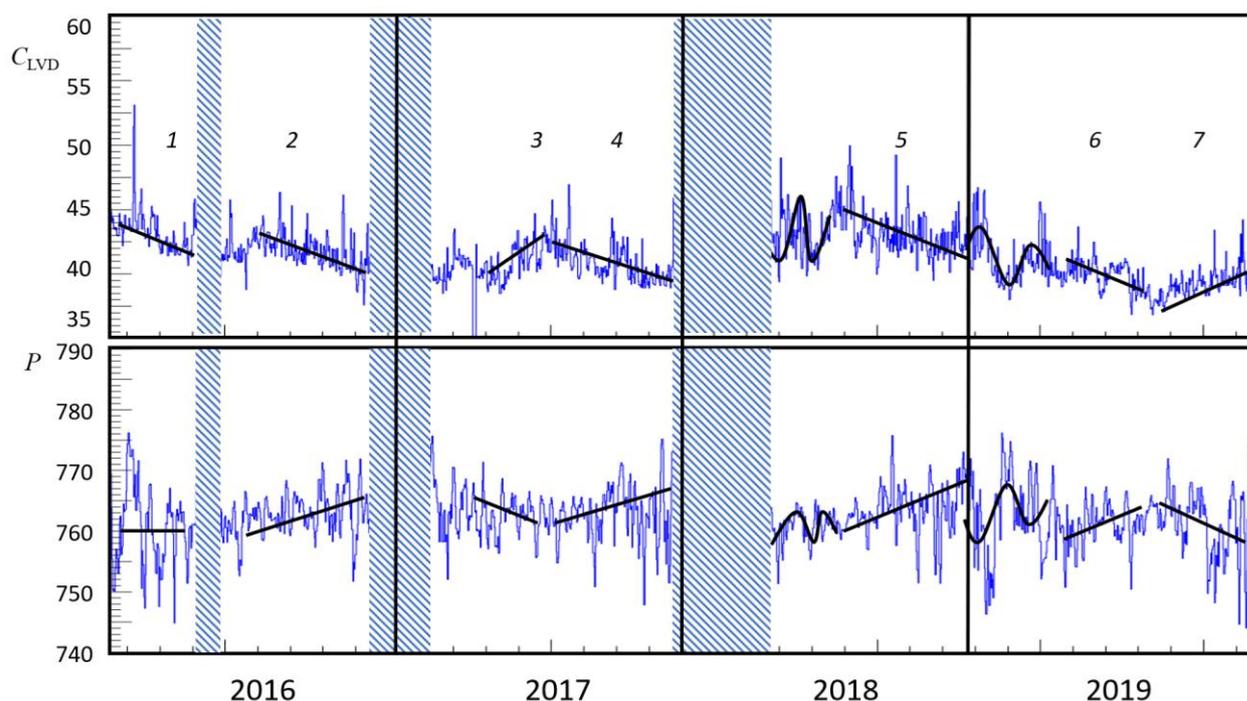


Рис. 3.20 - Временные ряды скорости счета гамма-квантов и атмосферного давления за период с 2004 по 2019 гг. Заштрихованные области – аномальные выбросы в гамма-квантах. Линии – отмеченные тренды (см. пояснение в тексте).

Таблица 3.5 Параметры наклонов трендов $C_{LVD}(t)$ и $P(t)$.

N	Дата начала тренда	Дата конца тренда	Число суток	Наклон dC_{LVD}	Наклон dP
1	31.01.2004	23.04.2004	83.3	-0.0030	0.0024
2	23.04.2004	15.07.2004	83.3	-0.0010	0.0024
3	26.08.2004	17.11.2004	83.3	0.0023	-0.0030
4	14.06.2005	25.07.2005	41.7	0.0080	-0.0035
5	25.07.2005	06.11.2005	104.2	-0.0019	0.0015
6	27.11.2005	08.01.2006	41.7	0.0012	0.0000
7	14.07.2006	28.12.2006	166.7	-0.0020	0.0020
8	03.10.2007	17.12.2007	75.0	-0.0019	0.0007
9	07.01.2008	14.03.2008	66.7	-0.0025	0.0020
10	20.04.2008	04.10.2008	166.7	0.0008	-0.0009
11	26.12.2008	23.07.2009	208.3	0.0010	0.0001
12	16.02.2010	02.08.2010	166.7	0.0013	-0.0007
13	24.10.2010	26.02.2011	125.0	-0.0014	0.0020
14	26.02.2011	12.05.2011	75.0	0.0005	-0.0020
15	18.05.2013	22.11.2013	187.5	0.0005	-0.0007
16	08.05.2014	21.10.2014	166.7	0.0009	0.0000
17	02.12.2014	10.04.2015	129.7	-0.0001	0.0000
18	10.04.2015	10.10.2015	183.3	0.0018	-0.0003
19	10.10.2015	12.12.2015	62.5	-0.0005	0.0035
20	12.02.2016	27.05.2016	104.2	-0.0006	0.0009

21	07.07.2016	09.11.2016	125.0	-0.0008	0.0003
22	21.02.2017	17.07.2017	145.8	0.0009	-0.0001
23	17.07.2017	10.12.2017	145.8	-0.0008	0.0006
24	27.07.2018	20.12.2018	145.8	-0.0006	0.0002
25	03.04.2019	06.08.2019	125.0	-0.0006	0.0009
26	06.08.2019	30.12.2019	145.8	0.0006	-0.0010
27	29.10.2019	14.06.2020	229.2	-0.0004	0.0002
28	28.12.2021	11.04.2022	104.2	0.0000	0.0000
29	11.04.2022	25.07.2022	104.2	0.0005	-0.0003
30	25.07.2022	27.11.2022	125.0	-0.0003	0.0009

На рис. 3.21 показана зависимость наклонов трендов изменений $C_{LVD}(t)$ и $P(t)$. Можно увидеть линейную зависимость между наклонами выбранных трендов $C_{LVD}(t)$ и $P(t)$. Аппроксимация точек выполнена функцией вида $f(x) = a + bx$.

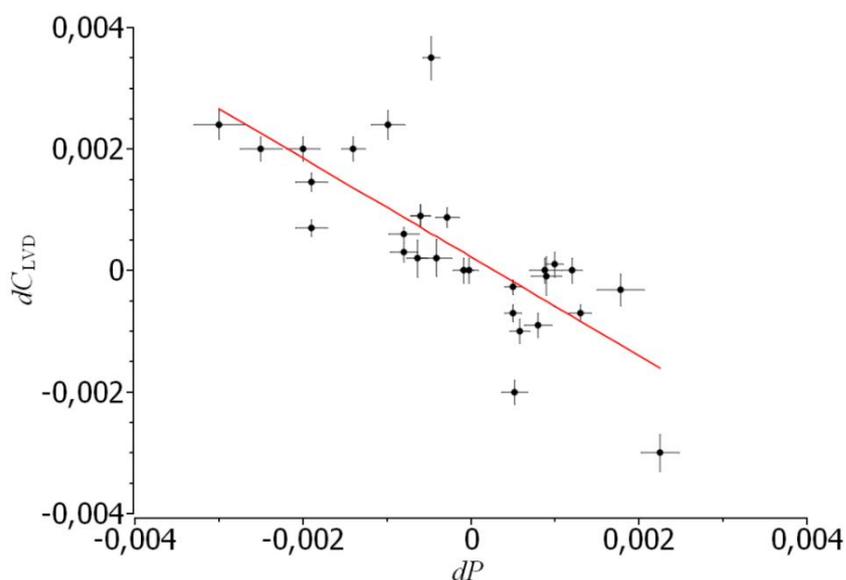


Рис. 3.21 - Зависимость наклонов трендов изменения $C_{LVD}(t)$ и $P(t)$. Прямая – приближение функцией $f(x) = a + bx$, где $a = 2.2 \times 10^{-4}$, $b = -0.81 \pm 0.13$.

3.6 Выводы

В 2019 – 2020 годах в подземном зале эксперимента LVD было проведено несколько серий измерений с помощью термогигрометра ИВТМ-7 М 6-Д 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 $(680 \pm 1 \text{ сис})$ мм рт. ст.

Сравнение величин атмосферного давления на поверхности и давления в подземном зале, измеренного с помощью термогигрометра в LVD, 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%. Используя высокую корреляцию между атмосферным давлением и давлением в экспериментальном зале, проведен долгосрочный корреляционный анализ данных LVD и давления из базы данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды.

В результате анализа часовых данных скорости счета гамма-квантов на детекторе LVD (на масштабах 1 час – 20 суток) не найдено прямой связи между скоростями их изменения и изменением атмосферного давления. Во время резких понижений давления не обнаружен задержанный пампинг-эффект для гамма-квантов. Отсутствие прямой корреляции и отсутствие наблюдения задержанного пампинг-эффекта может быть связано с вентиляцией подземного помещения и работой персонала лаборатории, а также с расположением детектора на высоте примерно 1000 м, где атмосферное давление составляет в среднем 680 мм рт. ст.

Была обнаружена несезонная сильная антикорреляция трендов изменения скорости счета гамма-квантов и атмосферного давления на масштабах порядка 3–4 месяцев.

Материалы главы опубликованы в работах: [39], [40], [42], [43], [48], [49]

Глава 4. Сезонные (годовые) и лунно-месячные вариации.

4.1 Фурье анализ временных рядов скорости счета гамма-квантов на LVD

Для поиска периодических сигналов в скорости счета был применен дискретный Фурье-анализ с использованием формул Бесселя для нахождения амплитуд гармоник косинуса и синуса с нулевой фазой. Потом результат приводился к одной функции косинуса (без синуса) с ненулевой фазой (для простого графического представления результатов). Параллельно с вычислением амплитуд гармоник и их фаз проводился перенос ошибок (на основе $s(y_n)$:

$$(z_m(y_n)) = \sqrt{\sum_{n=1}^{157800} \left(\frac{\partial z}{\partial y_n} \cdot s(y_n)\right)^2}, \text{ где } z_m(y_n) - \text{ функция амплитуды } m - \text{ой}$$

гармоники A_m , зависящая от всех значений y_n входной радоновой гистограммы, $s(y_n)$ - ошибка y_n . Для оценки значимости какой-либо гармоники на основе её амплитуды в этой же программе вычислялась амплитуда B_m гармоник эквивалентного по мощности Белого шума (и ошибка $s(B_m)$)

$$B_m \circ \circ \sqrt{\frac{1}{78900} \cdot \sum_{n=1}^{78900} A_m^2}, \text{ Гц.}$$

Для определения значимости каждой гармоники использовалась формула:

$$\eta_m = \frac{A_m - B_m}{s(A_m - B_m)} = \frac{A_m - B_m}{\sqrt{(s(A_m))^2 + (s(B_m))^2}}. \text{ Значимость гармоники показывает на сколько}$$

среднеквадратичных отклонений $s(A_m - B_m)$ амплитуда гармоники превышает амплитуду Белого шума.

Результатом Фурье-анализа являются амплитуды гармоник A_m в Гц и их ошибки, фазы гармоник в радианах и их ошибки, а также значимости η_m амплитуд гармоник.

Было использовано 157800 значений темпа счета LVD с 2004 по 2021 г (18 лет), период самой медленной гармоники номер $m=1$: $T_1 = 157800$ часов = 18 лет (частота $f_1 = 1/T_1$). Период самой быстрой гармоники номер 78900: $T_{78900} = 2$ часа.

Вычисленные амплитуды гармоник эквивалентного по мощности Белого шума $B=0.0495$ Гц, $s(B)=6.66 \cdot 10^{-4}$ Гц – среднеквадратичная ошибка величины B .

На рисунке 4.1 представлен график, полученный в результате Фурье анализа. В некоторых областях спектра гармоник наблюдаются ясно выраженные пики с весьма значимыми гармониками.

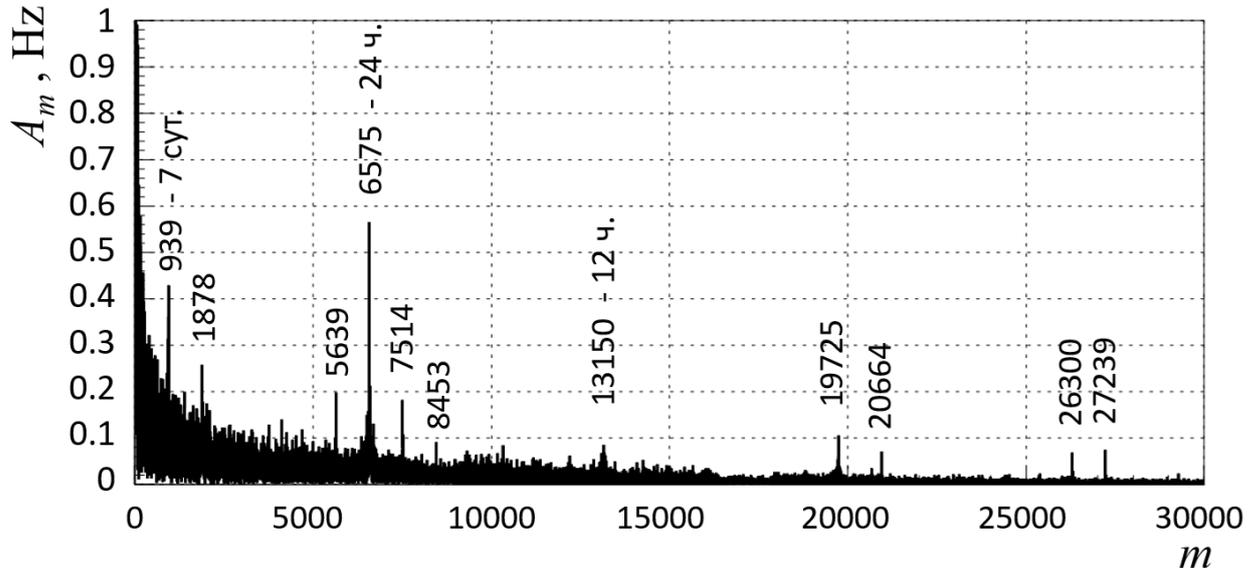


Рисунок 4.1 – Фурье гармониками.

Рассмотрим подробно значимые пики на рисунке 4.1. В результате Фурье анализа временного ряда данных эксперимента LVD по скорости счета гамма-квантов в подземном помещении в спектре гармоник с большой значимостью η найдены пики следующих периодов: $T=1$ сутки ($m = 6575$) – солнечно-суточные приливы в грунте, $\eta=10$; $T=7$ суток – ($m = 939$) работа персонала в подземной лаборатории и автомобильный трафик в транспортных туннелях, $\eta=10$.

Обозначим f_1 ($T = 1$ сутки) частоту самой значимой гармоники (суточный пик) с максимальной значимой амплитудой, а f_2 ($T = 7$ суток) – следующая по амплитуде гармоника. Комбинационные частоты должны зависеть в основном от этих двух частот: $f_{\text{комб}} = (nf_1 \pm kf_2)$, при условиях n, k целые ≥ 0 ; $f_{\text{комб}} > 0$. Ниже приведена таблица 4.1, содержащая десять номеров гармоник экспериментальных

видимых пиков (рис. 4.1) и их соответствие номерам гармоник комбинационных частот.

Совпадение комбинационных частот с наблюдаемыми значениями подтверждает корректность проведенного Фурье анализа.

Таблица 4.1 – Соответствие параметров комбинационных частот и экспериментальных видимых пиков.

Период, в сутках	Комбинационная частота $f_{\text{комб}}$	Номер гармоники m	A_m , Гц	Видимый пик, m	Значимость η
7.002	f_2	939	0.43	939	+10.0
3.501	$2f_2$	$2 \times 939 = 1878$	0.26	1879	+5.98
1.166	$f_1 - f_2$	$6575 - 939 = 5639$	0.20	5635	+4.26
1.000	f_1	6575	0.56	6575	+10.0
0.875	$f_1 + f_2$	$6575 + 939 = 7514$	0.18	7515	+3.82
0.778	$f_1 + 2f_2$	$6575 - 2 \times 939 = 8453$	0.090	8454	+1.18
0.500	$2f_1$	$2 \times 6575 = 13150$	0.077	13149	+0.79
0.333	$3f_1$	$3 \times 6575 = 19725$	0.074	19726	+0.70
0.318	$3f_1 + f_2$	$3 \times 6575 + 939 = 20664$	0.032	20664	-0.51
0.250	$4f_1$	$4 \times 6575 = 26300$	0.038	26301	-0.33
0.241	$4f_1 + f_2$	$4 \times 6575 + 939 = 27239$	0.075	27231	+0.74

На рисунке 4.1 один из самых высоких пиков – $m = 6575$ с амплитудой $A_m = 0.56$ Гц и значимостью $\eta_m \approx 10$ – это пик с периодом $T = 1$ сутки = 24 часа. Это солнечно-суточная приливная волна S1 (по классификации Мельхиора [79]). Справа и слева от него видны комбинационные частоты: $(f_1 - f_2)$, гармоника ($m = 6575 - 939 = 5636$), со значимостью $\eta_m \approx 4.2$. и $(f_1 + f_2)$ – гармоника ($m = 6575 + 939 = 7514$), значимость $\eta_m \approx 3.8$. На рисунке 4.2 приведен диапазон гармоник от $m = 6300$ до $m = 6800$. В центре виден суточный пик $m = 6575$ – он очень узкий, шириной несколько гармоник. Ширина пика на полувисоте ~ 5 гармоник. $T_{6575} = 1.0000 \pm 0.0005$ суток. Диапазон ± 0.0005 – это примерно соответствует нестабильности солнечных суток из-за эксцентриситета орбиты Земли.

Волны M1 и M2 – лунных суточных и полусуточных периодов можно обнаружить, группируя гармоники $m = 6278 - 6432$ $T = (1.01 - 1.06)$ суток и

$m=12373-12988$ $T = (0.506 - 0.531)$ суток, соответственно. Их значимость $\eta = 7.96$ для M1 и $\eta = 5.42$ для M2.

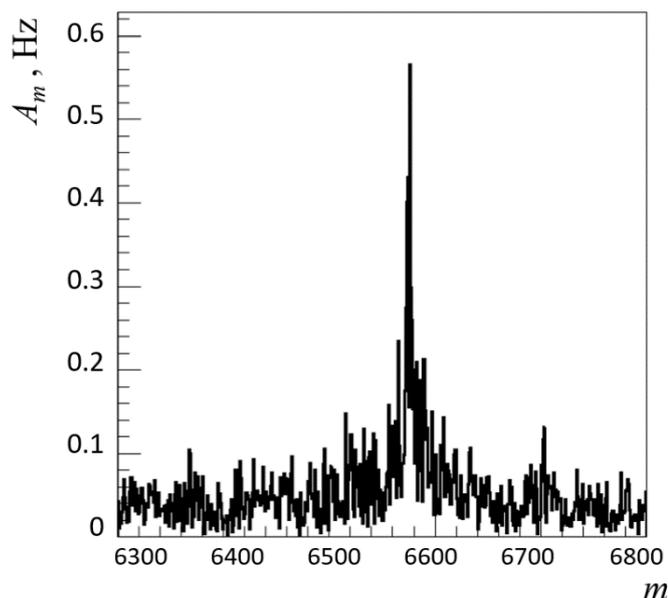


Рисунок 4.2 – Фурье гармоники $m = 6300 - 6800$.

Пики от лунно-месячных вариаций 27.2 – 29.8 суток и от годовых вариаций 365 – 366 суток находятся в диапазоне гармоник $m = 220 - 245$ и $m \sim 18$, соответственно. Определить их можно группируя гармоники, но значимость их небольшая: для синодического периода $T = (29.3 - 29.8)$ суток – средняя амплитуда $A_m=0.457$ Гц со значимостью $\eta=2.7$; для аномалистического $T = 27.55455$ суток – средняя амплитуда $A_m=0.223$ Гц $\eta=1.38$; для годового периода между перигелиями $T = 365.24$ суток – средняя амплитуда $A_m=1.168$ Гц $\eta=2.6$.

Фаза – максимум амплитуды гармоники была определена только для синодического периода ($T=29.5$ суток) φ_m по одной самой большой по амплитуде гармонике. Переводя радианы в сутки и зная день полнолуния с начала набора статистики было найдено, что через $\Delta t = (3.51 \pm 0.24)$ суток после полнолуния LVD «видит» увеличение выхода радона по измеряемым детектором гамма-квантам. Другие фазы определить невозможно, т.к. искомые периоды во временном ряде скоростей счета гамма-квантов состоят из нескольких гармоник со своей фазой. Поэтому единственным методом нахождения фазы для уже

“заранее известных” периодов остается метод наложения эпох. Далее будут описаны результаты нахождения годовых и лунно-месячных вариаций методом наложения эпох.

4.2 Сезонные вариации

С целью выделения долговременной составляющей вариации концентрации радона 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 φ_y с достаточной точностью была установлена методом «наложения эпох»: при этом соответствующие данные за 12 лет наблюдений накладывались друг на друга и усреднялись (рис. 4.3). Эти результаты хорошо обеспечены статистически: измерения проводятся каждые 10 минут, а затем усредняются по большому объему данных. Каждый бин гистограммы рисунка 4.3 содержит порядка 10^9 отсчетов, что дает относительную ошибку порядка 0.003%.

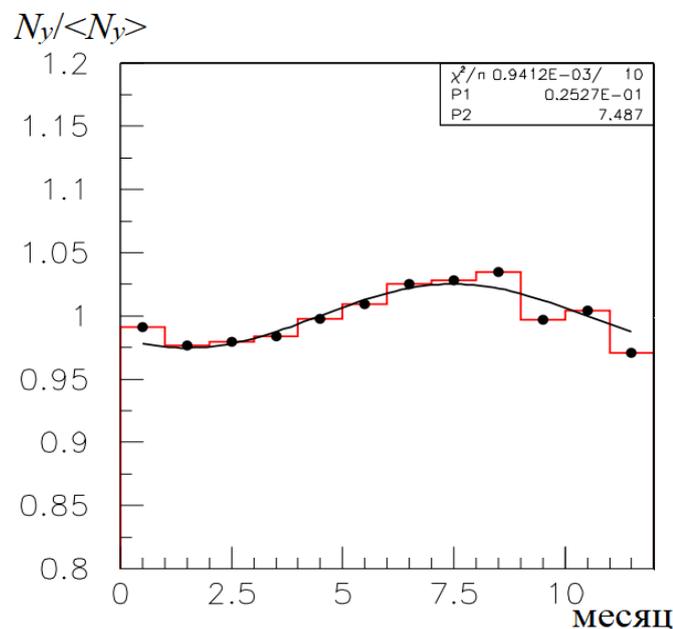


Рисунок 4.3 – Сезонные вариации скорости счета гамма-квантов LVD, в относительных величинах $N_y/\langle N_y \rangle$, полученные методом наложения эпох. Кривая – аппроксимация гармонической функцией (см. пояснение в тексте).

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.

4.3 Лунно-месячные вариации

Поиск вариаций, связанных с гравитационными эффектами от вращения Земли и Луны проводился для синодического периода. Синодический лунно-месячный период (промежуток между одинаковыми фазами луны) составляет 29.53 земных суток. Другие лунные периоды, аномалистический (27.55 сут.), сидерический или звездный (27.32 сут.), драконический (27.22 сут.), вносят искажения в поиск вариаций, связанных с максимальными приливными эффектами. Поэтому, фиксируя период около 29.5 суток, мы будем выделять самую сильную модуляцию временного ряда по гармоническому закону для определения амплитуды и фазы.

4.3.1 Метод наложения эпох I

В этом методе эпоха составляет 708 часов ($708/24 = 29.5$ суток). Начиная с выбранной даты, например, с 01 января 2004 года, каждому часу присваивается номер от 0 до конца эпохи в 708 часов. Затем начинается новая эпоха, которая также длится 708 часов, и так до конца временного ряда. Для анализа была использована статистика за 18 лет: 6588 суток = 158118 часов, в которую укладывается 223 эпохи по 708 часов. Далее данные с одинаковыми часами в эпохе суммируются и делятся на число значений, записанных в этот час.

Результат метода наложения лунно-месячных эпох показан на рисунке 4.4а, б. Приведены два вида гистограмм для одного и того же набора данных. На рисунке 4.4а – скорость счета гамма-квантов LVD, деленная на среднее за год $N_m / \langle N_m \rangle$ с бином 24 часа. На рисунке 4.4б приведены данные в единицах скорости счета LVD (имп./сч./сек.) с бином равным 1 час. Мелкомасштабные флуктуации скорости счета (рис. 4.4б) не влияют на плавный гармонический вид гистограммы длительностью лунный месяц и не влияют на определение амплитуды и фазы модуляции.

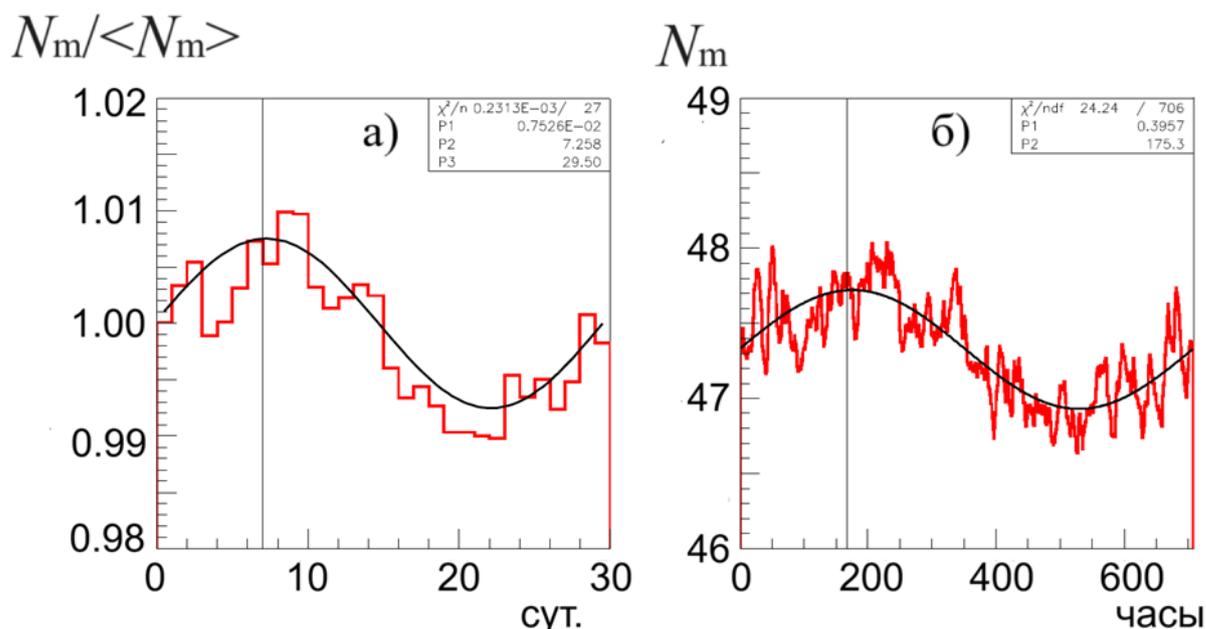


Рисунок 4.4 – Лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов LVD за период 01.01.2004 – 31.12.2021 гг.: а) нормированные на среднее в год (бин 24 часа), б) в абсолютных единицах (бин 1 час). Кривая – аппроксимация

гармонической функцией а) $f(t)=1+P1\times\cos(2\pi(t - P2)/P3)$, б) $f(t)=47.33+P1\times\cos(2\pi(t - P2)/708.)$ (эпоха $T=708$ ч. (см. текст)). Результаты фитирования (параметры $P1, P2, P3$) приведены в верхнем углу гистограмм. Вертикальная линия – день полнолуния от начала 2004 года.

В результате аппроксимации распределения законом $N_m(t)=A+[\delta N_m/\langle N_m \rangle]\times\cos(2\pi(t-\varphi_m)/T)$ и приняв $A = 1, T = 29.5$ суток (рис.4.4а) и $A = \langle N_m \rangle, T = 708$ часов (рис. 4.4б), были получены значения амплитуды модуляции $\delta N_m / \langle N_m \rangle = (0.8 \pm 0.15)\%$ и фаза $\varphi_m = 8 \pm 3$ (максимум кривой). При этом, день полнолуния приходится на 7-е сутки с 01.01.2004 г. Такой же анализ был сделан для нескольких периодов данных из статистики 01.01.2004 – 31.12.2021 гг. Номер суток, на которые приходится полнолуние определяется первым полнолунием в году, с которого начинается цикл суммирования эпох. Например, для данных с 2009 года полнолуние приходится на 11-е сутки с начала 2009 года, для данных с 2011 года полнолуние приходится на 20-е сутки с начала 2011 года. Аппроксимация гистограмм дает фазу $\varphi_m = 15 \pm 3$ для данных с 2009 года (рис. 4.5) и $\varphi_m = 21 \pm 3$ для данных с 2011 года (рис. 4.6).

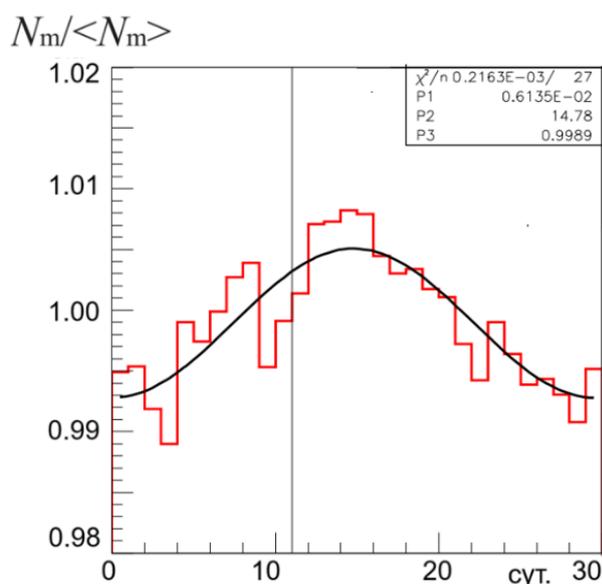


Рисунок 4.5 – Лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов $\delta N_m / \langle N_m \rangle$. Данные за период 01.01.2009 – 31.12.2021 гг. приведены на среднее в год с бином 24 часа.

Кривая – аппроксимация гармонической функцией $f(t)=P3+P1\times\cos(2\pi(t-P2)/T)$, где $T=29.5$ суток. Результат фитирования (параметры $P1$, $P2$, $P3$) приведены в верхнем углу гистограммы. Полнолуние приходится на 11 сутки с начала 2009 года.

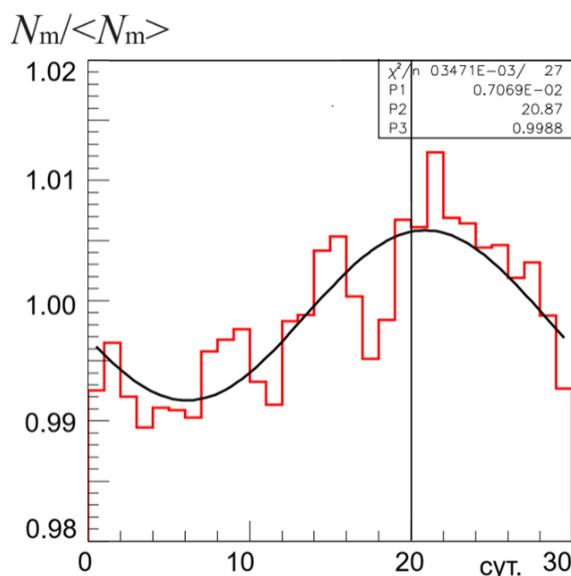


Рисунок 4.6 – Лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов $\delta N_m / \langle N_m \rangle$, данные за период 01.01.2011 – 31.12.2021 гг. приведены на среднее в год с бином 24 часа.

Кривая – аппроксимация гармонической функцией $f(t)=P3+P1\times\cos(2\pi(t - P2)/T)$, $T=29.5$ суток. Результат фитирования (параметры $P1$, $P2$, $P3$) приведены в верхнем углу гистограммы. Полнолуние приходится на 20 сутки с начала 2011 года.

Эпоха 708 часов (29.5 суток) была выбрана как наиболее вероятная для поиска лунно-месячных вариаций. Для других периодов, в диапазоне от 27 до 30 суток была проверена методика поиска модуляции, используя такую же процедуру фиксирования эпохи. Для статистики 2004 — 2021 гг. построены вариации скорости счета с различными эпохами по методу, описанному выше. Зависимость относительной амплитуды модуляции $\delta N_m / \langle N_m \rangle$ от выбранных эпох показана на рисунке 4.7.

Самая большая относительная амплитуда $\delta \cong 0.8 \%$ соответствует 708 часам = 29.5 суткам (синодический период). Меньшие амплитуды (0.6 %) в районе 27 – 28 суток близки к другим гармоникам лунных периодов (аномалистическому и сидерическому).

Для другого периода статистики 2009 — 2021 гг. зависимость относительной амплитуды от эпохи (рис. 4.8) имеет похожую форму с максимумом в районе 29.5 суток.

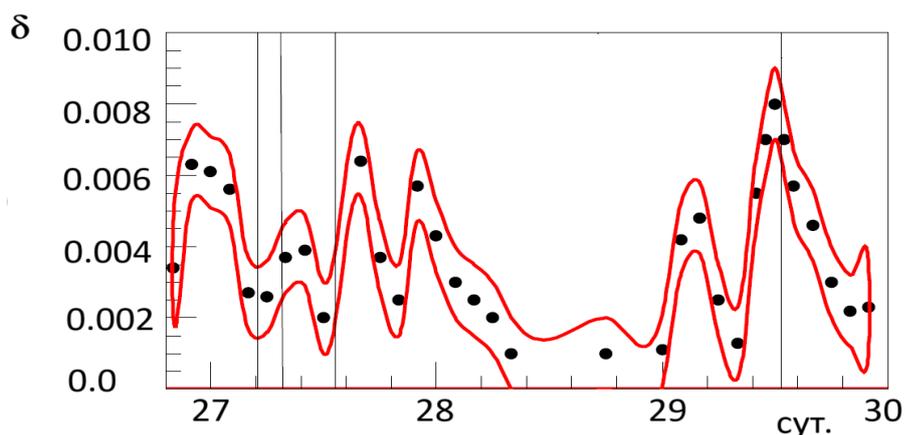


Рисунок 4.7 – Зависимость относительной амплитуды модуляции от выбранной эпохи (статистика 01.01.2004 — 31.12.2021 гг.). Кривыми показаны диапазоны ошибок определения амплитуды модуляции.

Линиями отмечены периоды – 27.22; 27.32; 27.55; 29.53.

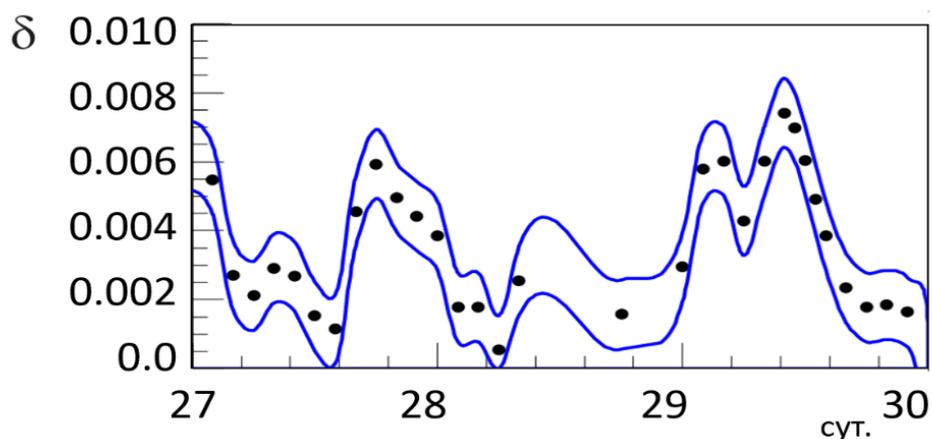


Рисунок 4.8 – Зависимость относительной амплитуды модуляции от выбранной эпохи (статистика 01.01.2009 — 31.12.2021 гг.). Кривыми показаны диапазоны ошибок определения амплитуды модуляции.

Можно увидеть, что в частотном спектре присутствуют другие колебательные процессы, источником которых является техническая активность персонала, обслуживающего эксперименты (периоды рабочей недели и рабочих суток). Фаза лунно-месячных вариаций, самого большого пика (для гармоник 29.5 суток) соответствует дню полнолуния с задержкой на 3 – 5 суток.

4.3.2 Метод наложения эпох II

Для этого метода выделяются лунные месяцы (синодического периода) и фиксируются 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. Затем данные соответствующих суток суммируются и усредняются.

Статистика 2009 – 2019 годов была разделена на два периода: а) дневные часы с 08 утра по 20 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. Влияние техногенных факторов описано в главе 3: темп счета LVD по нижнему порогу выше в рабочие дни днем и меньше в ночные часы и в выходные дни.

На рисунках 4.9а и б представлены лунно-месячные вариации с эпохой один лунный месяц. На 15 бин гистограммы всегда приходится полнолуние. Данные S_{LVD} нормированы на среднее значение в год. Аппроксимация распределения законом $f(t)=1+[\delta N_m / \langle N_m \rangle] \times \cos(2\pi(t - \phi_m)/T)$, где период $T=29.5$ суток дала амплитуду модуляции $\delta_d = \delta_n = 0.7\%$ и фазой сдвинутой относительно полнолуния

на ~ 5 суток, для дневных и ночных периодов одинаково. 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.

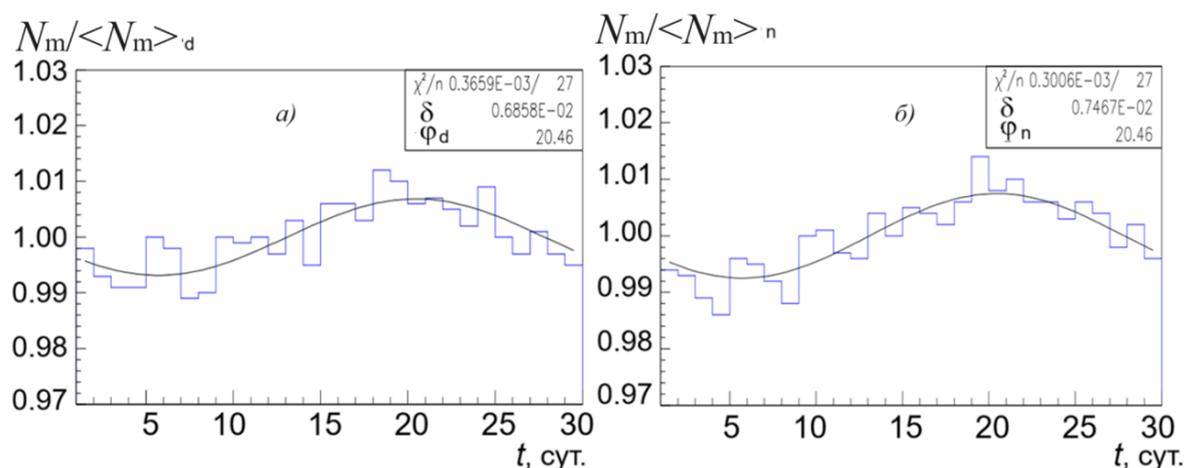


Рисунок 4.9 – Лунно-месячные вариации $N_m/\langle N_m \rangle$ концентрации радона
а) в дневное, б) в ночное время.

4.4 Выводы

С помощью Фурье-анализа во временных рядах скорости счета гамма-квантов на LVD определены с большой значимостью $\eta = 10\sigma$: суточный период ($T = 24$ часа), связанный с солнечно-суточными приливами в грунте и недельный период ($T=7$ суток), связанный с работой персонала в подземной лаборатории.

Найдены годовые (сезонные) вариации скорости счета гамма-квантов. 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. Амплитуда и фаза сезонных вариаций меняется год от года и связана с колебаниями осадков и скоростью таяния снега в горах в летний период в Итальянском регионе.

Определены параметры вариаций скорости счета гамма-квантов детектором LVD, связанные с приливами от гравитационных эффектов, вызванных относительным движением Земли, Луны и Солнца. Методом наложения эпох определены лунно-месячные вариации с периодом 29.5 суток. Максимум амплитуды вариаций $\delta_m = (0.8 \pm 0.15)\%$ приходится на 3–5 день после полнолуния.

Земная кора, как и литосфера в целом, под воздействием приливных волн в Земле постоянно подвергается деформациям: во время положительных полуволн – растяжению, а во время отрицательных – сжатию. В результате таких деформаций в породах, из которых состоит земная кора, возникают внутренние напряжения, воздействующие на их физические свойства, а также изменяется объем микропор, микротрещин и капилляров. Изменения объемов микропор, капилляров и микротрещин влечет за собой изменение соотношения объемов поровой и гравитационной (свободной) воды в водоносных слоях. Результаты проведенного анализа подтверждают, что в районах геофизических разломов возрастает эманация глубинных газов, коррелирующая с приливами в земной коре.

Анализ и результаты главы опубликованы в работах: [37], [45], [46], [47].

Заключение

Диссертационная работа посвящена изучению вариаций гамма-квантов от естественной радиоактивности в подземном зале эксперимента LVD и поиску причин их возникновения. В результате проведенного исследования были получены следующие результаты:

1. Разработан метод предварительной подготовки и представления данных эксперимента LVD по низкоэнергетическому ($E > 0.5$ МэВ) каналу регистрации как в числовом, так и в графическом виде. Выполнена обработка данных с 1992 по 2023 гг. В результате анализа временного распределения по каждому счетчику установки определены критерии для их автоматического отбора. Для изучения переменной составляющей радиоактивного фона – вариаций концентрации радона в атмосфере подземного зала детектора – полностью исключались все наружные счетчики установки LVD. Внутренний объем детектора, защищенный от радиоактивности скалы хотя бы одним слоем счетчиков, составил 80 счетчиков по 1.5 м^3 для каждой башни. Основным критерием отбора является скорость счета импульсов в диапазоне от 200 до 2000 отсчетов в течение 10-ти секундного интервала для внутренних счетчиков. Скорость счета гамма-квантов, регистрируемых в детекторе, усреднялась по часу и приводилась на счетчик в секунду. 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.
2. Мониторинг концентрации радона в атмосфере подземного зала возможен благодаря регистрации в LVD гамма-квантов от дочерних ядер радона. Резкое увеличение скорости счета гамма-квантов связано с инъекцией радона в атмосферу зала. Радоновые выбросы регистрируются установками

как пики на счетной характеристике фона, превышающие в максимуме средний темп счета до 2 раз. Форма “радонового” 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 τ вентиляции составляет порядка 3 часов. По окончании пика величина концентрации выходит на равновесное значение.

Проведена серия специальных измерений, которые дали возможность однозначно ассоциировать пики именно с инъекцией радона. Найдено соотношение между повышением концентрации радона в подземном зале и увеличением скорости счета гамма-квантов. При концентрации радона в подземном помещении равной 20 Бк/м^3 часть постоянного фона на установке LVD, обусловленная радоном составляет $6.2 \pm 0.5\%$. Таким образом, фон LVD по нижнему порогу можно разделить на две составляющие: постоянную, связанную с собственной радиоактивностью материалов установки и окружающей среды (в основном, скальной породы), а также постоянной (равновесной) концентрацией радона, и переменную, обусловленную изменением концентрации радона в подземном зале эксперимента, вызванную внешними факторами.

3. В подземном экспериментальном зале, где расположена установка LVD имеется вентиляция, которая работает практически постоянно. Воздух для вентиляции забирается из долины. Можно выделить два периода работы установки, которые связаны с разной работой системы вентиляции в экспериментальном зале установки LVD. Период I, 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. 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 поведении суточных и недельных вариаций $C_{LVD}(t)$ можно увидеть отличия, обусловленные разной работой системы вентиляции. В период I 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 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 Ковид-19, концентрация радона не имела выраженных суточных вариаций оставалась на «ночном» уровне. Помимо этого, имеется часовой сдвиг между 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).

Используя разработанный алгоритм построения временных рядов скорости счета гамма-квантов, проанализированы данные в установки LSD (Монблан, 1985-1999 гг.). Являясь одинаковыми по 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.

5. Сравнение величин атмосферного давления на поверхности и давления в подземном зале, измеренного с помощью термогигрометра в LVD, 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 базу данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды.

В результате анализа часовых данных скорости счета гамма-квантов на установке LVD (на масштабах 1 час – 20 суток) не найдено прямой связи между скоростями их изменения и изменением атмосферного давления. Во время резких понижений давления не обнаружен задержанный пампинг-эффект для гамма-квантов (в вентилируемом помещении на высоте ~1000 м над уровнем моря при давлении 680 мм рт. ст.).

6. Найдены годовые (сезонные) вариации скорости счета гамма-квантов. За период с 2004 по 2021 годы средняя амплитуда вариаций составила $\delta_y = (3.0 \pm 1.1)\%$, фаза $\phi_y = (7.5 \pm 0.5)$ мес., которая соответствует середине августа. Амплитуда и фаза сезонных вариаций изменяется год от года и связана с колебаниями осадков и таянием снега в горах в зимний период в Итальянском регионе.
7. Методом наложения эпох двумя независимыми способами определены лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов с периодом 29.5 суток. Использовались данные LVD с 2004 по 2021 гг. Максимум амплитуды вариаций составляет $\delta_m = (0.8 \pm 0.15)\%$ приходится на 3–5 день после полнолуния.

В продолжение настоящей работы планируется детальное изучение обнаруженных трендов изменения скорости счета гамма-квантов и атмосферного давления на масштабах порядка 3–4 мес. (см. Главу 3, п. 3.5). Они имеют сильную антикорреляцию и носят несезонный характер. Дальнейшее изучение этой зависимости 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 Фёдоровичу 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 сокращений и обозначений

LVD – Large Volume Detector – Детектор Большого Объема

LSD – Liquid Scintillation Detector – Жидкостной Сцинтилляционный Детектор

М в. э. – метры водного эквивалента

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

ПТФЭ – политетрафторэтилен

HET – High Energy Threshold – триггер высокоэнергетического порога

LET – Low Energy Threshold – триггер низкоэнергетического порога

C_{LVD} – скорость счета гамма-квантов на установке LVD

CR – скорость счета гамма-квантов, обусловленных радоном, на установке LVD

ТГ – термогигрометр

ERA5 – база данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды

P_{atm} – атмосферное давление

P_{hall} – давление в подземном экспериментальном зале

Список литературы

1. *Bari G. et al.* LVD at Gran Sasso // Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. A. — 1988. — Т. 264. — С. 5–17.
2. *Agafonova N. et al.* Characterization of the varying flux of atmospheric muons measured with the Large Volume Detector for 24 years // Phys. Rev. D. — 2019. — Т. 100. — С. 062002.
3. А. Беттини. Физика за пределами стандартной модели. Эксперименты в Лаборатории Гран Сассо. // УФН. — 2001. — Т. 171 N9. — С. 977–1003.
4. *Belotti E., Burashi M., Fiorini E. and Liguori C.* New Measurement of rock contaminations and neutron activity in the Gran Sasso tunnel. // 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
5. *Haffke M., Baudis L., Bruch T., Ferella A.D. et al.* Background measurements in the Gran Sasso Underground Laboratory //Nucl. Instrum. Meth. A. — 2011. — Т. 643. — С. 36. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900211007650>
6. INFN Gran Sasso National Laboratory (LNGS). — URL: <https://www.lngs.infn.it/> (дата обращения 20.01.2022)
7. Справочник геолога по поискам и разведке месторождений урана. Н.П. Лаверов, М.В. Шумилин, И.В. Мельников, И.А. Лучин. М: Недра. —1989. — 270 с. (ISBN 5-247-00758-1)
8. Баранов В. И., Титаева Н. А., Радиогeология, М: Издательство Московского университета. — 1973. — 124 с.

9. *Bugaev E.V. et al.* Atmospheric muon flux at sea level, underground and underwater // *Phys. Rev. D.* — 1998. — Т. 58. — С. 054001.
10. *Зацепин Г. Т., Ряжская О. Г.* Расчет генерации нейтронов μ -мезонами для различных глубин в грунте. // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* — 1965. — Т. 29. — С.1946.
11. *Безруков Л. Б. и др.* Исследование зависимости ядерных эффектов, вызываемых мюонами космических лучей, от глубины грунта // *Яд. Физ.* — 1973. —Т. 17. — С. 98.
12. *Агафонова Н.Ю., Мальгин А.С.* Анализ экспериментальных данных по выходу нейтронов от мюонов. *Яд. Физ.* — 2013. — Т.76, No.5. —с.650-658. — DOI:10.7868/s0044002713050024.
13. Мальгин А. С., Космогенные нейтроны в низкофонных подземных экспериментах. Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н. (ИЯИ РАН, Москва, 2018)
14. *Agafonova N. Yu.* (on behalf of the LVD Collaboration) Measurement of the muon-induced neutron seasonal modulation with LVD // arXiv:1701.04620. — 2017.
15. *Klinger J. and Kudryavtsev V. A.* Muon-Induced Neutrons Do Not Explain the DAMA Data // *Phys. Rev. Lett.* — 2015. — Т. 114. — С. 151301. — URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.114.151301>
16. *Yasuoka Y., Nagahama H., Muto J., Mukai T.* The anomaly in atmospheric radon concentrations prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake in Japan // *Radiat. Environ. Med.* — 2018. — Т. 7. — С. 86–94. — URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/radiatenvironmed/7/2/7_86/_pdf
17. *Iwata D., Nagahama H., Muto J., Yasuoka Y.* Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. // *Sci. Rep.* — 2018. — Т. 8. — С. 13028. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31341-5>

18. *Soldati G., Cannelli V., Piersanti A.* Monitoring soil radon during the 2016–2017 central Italy sequence in light of seismicity // *Sci Rep* — 2020. — Т. 10. — С. 13137. — DOI: 10.1038/s41598-020-69821-2.
19. Н. Ю. Агафонова, В. А. Алексеев, Е.А. Добрынина, В. В. Кузнецов, А. С. Мальгин, О. Г. Рязская, В. Ф. Якушев, Препринт № 1071/2001 ИЯИ РАН (2001)
20. *Микляева П. С., Петрова Т. Б.* Исследования аномальных сезонных вариаций плотностей потока радона в зоне разлома // *Геохимия*. — 2021. — Т. 66, № 4. — С. 364–378. — DOI: 10.31857/S001675252104004X.
21. *Авдуалиев А.К., Войтов Г.И., Рудаков В.П.* Радоновый предвестник некоторых сильных землетрясений Средней Азии // *ДАН СССР*. — 1986. — Т. 291. № 4. — С. 924-927.
22. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. —URL: <http://cnt.rm.ingv.it/> (дата обращения 16.09.2024)
23. Курскеев А.К. Проблемы прогнозирования землетрясений. Алма-Ата: Наука, — 1990.
24. *Salikhov N., Shepetov A., Pak G., Nurakynov S., Ryabov V., Saduyev N., Sadykov T., Zhantayev Z., Zhukov V.* Monitoring of Gamma Radiation Prior to Earthquakes in a Study of Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling in Northern Tien Shan // *Atmosphere* — 2022. — Т. 13. — С. 1667. — URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/10/1667>
25. *Боков В. Н., Гутшабаш Е. Ш., Потиха Л. З.* Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений. // *Ученые записки РГГМУ* — 2011. — Т. 18. — С. 173. — URL: <https://studylib.ru/doc/2066991/geofizika>
26. *Иванов В. А., Бурым Ю. А.* Краткосрочные атмосферно-барические предвестники землетрясений // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология* — 2020. — Т. 6. — С. 181. — URL: <https://sn-geography.cfuv.ru/wp->

content/uploads/2021/04/UZ-Geografiya-Geologiya----4-2020-Ivanov-Buryim.pdf

27. Бирюлин С. В., Пространственно-временные закономерности проявления аномалий объемной активности радона перед тектоническими землетрясениями в районе Южных Курил. Дис. ... канд. физ.-мат. наук Екатеринбург — 2021. — С.137. — URL: <http://crust.irk.ru/images/upload/newsfull216/3172.pdf>
28. *Tuccimei P., Mollo S., Vinciguerra S., Castelluccio M., Soligo M.* Radon and thoron emission from lithophysae-rich tuff under increasing deformation: An experimental study// *Geophys. Res. Lett.* — 2010. — Т. **37** — С. L05305. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009GL042134>
29. *Уткин В. И., Юрков А. К.* Радон как индикатор геодинамических процессов // *Геология и геофизика.* — 2010. — Т. **51.** — С. **277.** — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_13072645_68720223.pdf
30. *Адушкин В. В., Локтев Д. Н., А. Спивак А.* Влияние барических возмущений на микросейсмические процессы в земной коре // *Физика Земли.* — 2008. — Т. **6.** — С. **77.** — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_10120618_78145120.pdf
31. *Plastino W, Laubenstein M, Nisi S, Peresan A, Povinec PP, Balata M, Bella F, Cardarelli A, Ciarletti M, Copia L, De Deo M, Gallese B, Ioannucci L.* Uranium, radium and tritium groundwater monitoring at INFN-Gran Sasso National Laboratory, Italy. // *J Radioanal Nucl. Chem.* — 2013. — Т. **295.** — С. **585–592.** — <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1818-7>.
32. *Bernabei R. et al.* DAMA/LIBRA results and perspectives. // Proceedings to the 19th Workshop "What Comes Beyond the Standard Models", Bled, July 11 - 19, 2016, DOI:10.1051/epjconf/201713605001, arXiv:1612.01387 [hep-ex].
33. *Bernabei R., Belli P., Cappella F. et al.* Dark Matter: DAMA/LIBRA and its perspectives // arXiv:2209.00882. — 2022.

34. *Алексеев В.В., Джаппуев Д.Д., Козяревский В.А. и др.* Анализ вариаций потока тепловых нейтронов на высоте 1700 м над уровнем моря // Изв. РАН. Сер. физ. — 2007. — Т. 71. № 7. — С. 1075-1078. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_9537159_20807473.pdf
35. *Алексеев В.В., Гаврилюк Ю.М., Громушкин Д.М. и др.* Связь вариаций потока тепловых нейтронов из земной коры с лунными периодами и сейсмической активностью // Физика Земли. — 2009. № 8. — С. 91-100. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_12600830_44294869.pdf
36. *Стенькин Ю.В., Алексеев В.В., Громушкин Д.М. и др.* Подземная физика и эффект влияния барометрического давления на подземный фоновый поток тепловых нейтронов // ЖЭТФ. — 2017. — Т. 151. № 5. — С. 845-849. — DOI: 10.7868/S0044451017050054. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29214661_16024300.pdf
37. *Агафонова Н.Ю., В.В. Ашихмин, В.Л. Дадыкин, Е.А. Добрынина, Р.И. Еникеев, А.С. Мальгин, О.Г. Ряжская, И.Р. Шакирьянова, В.Ф. Якушев и коллаборация LVD* Сезонные вариации потока нейтронов, генерируемых мюонами, и фона естественной радиоактивности в подземной Лаборатории Гран Сассо // Известия РАН. Сер. Физ. — 2017. — Т.81, №4. — С. 551-554. DOI: 10.7868/S0367676517040032
38. *Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, Е.А. Добрынина, Р.И. Еникеев, А.С. Мальгин, О.Г. Ряжская, И.Р. Шакирьянова, В.Ф. Якушев* Эксперимент LVD: 25 лет работы // Ядерная Физика. — 2018. — Т. 81, №. — С. 85-94. DOI: 10.7868/S0044002718010038
39. *Н.Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, К. Р. Рудаков, О. Г. Ряжская, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев* Изучение вариаций низкоэнергетического фона с помощью подземного эксперимента LVD // Известия РАН Сер. Физ. — 2019. — Т. 83, № 5. — с. 673-675. DOI: 10.1134/S0367676519050041

40. *N. Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina, R.I. Enikeev, N.A. Filimonova, O.G. Ryzhskaya, I.R. Shakyrianova, V.F. Yakushev (on behalf of the LVD Collaboration)* Variations of Atmospheric Muons and Background Measured with Large Volume Detector // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2021. — V. 84, No. 6. — P. 1065-1069. DOI: 10.1134/S1063778821130019
41. *Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, О. Г. Рязжская, Н.А. Филимонова, И.Р. Шакирьянова, В.Ф. Якушев и коллаборация LVD* Отклик детектора LVD на землетрясения в центральной Италии // *Известия РАН. Сер. Физ.* — 2021. — Т.85, N11. — С. 1661-1665. DOI: 10.31857/S036767652111003X
42. *N. Yu. Agafonova, M. Aglietta, P. Antonioli, V. V. Ashikhmin, G. Bari, G. Bruno, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, W. Fulgione, P. Galeotti, M. Garbini, P. L. Ghia, P. Giusti, E. Kemp, A. S. Malgin, A. Molinaro, R. Persiani, I. A. Pless, O. G. Ryzhskaya, G. Sartorelli, I. R. Shakiryanova, M. Selvi, G. C. Trinchero, C. F. Vigorito, V. F. Yakushev, and A. Zichichi* Analysis of Cosmogenic Neutron Characteristics and the Pulses Counting Rate Using ASD, LSD, and LVD Scintillation Detectors// *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2022. — V. 134, No. 4. — P. 449–458. DOI: 10.1134/S1063776122040124
43. *Н.Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, Н. А. Филимонова (от имени коллаборации LVD)* Регистрация распадов радона с помощью нейтринного детектора LVD // *ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ*. — 2023. — Т. 78(1), — С. 2310202. DOI: 10.55959/MSU0579-9392.78.2310202
44. *Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, Н. А. Филимонова, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев (от имени коллаборации LVD)* Влияние давления и вентиляции в экспериментальном зале на скорость счета фоновых событий детектора LVD // *Известия РАН Сер. Физ.* — 2023. — Т. 87, № 7. — С. 1045–1047. DOI: 10.31857/S0367676523701879
45. *N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, N. A. Filimonova, I. R. Shakiryanova, and V. F. Yakushev and LVD Collaboration*

- Long-term Analysis of the Energy Calibration of LVD Counters // Bull. of the Rus. Acad. of Sci.: Physics. — 2023. — V. 87, No. 7. — P. 1053–1055. DOI: 10.3103/S1062873823702404
46. Н. Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, И. Р. Шакирьянова, Н. А. Филимонова
Периодические вариации концентрации радона в подземной Лаборатории Гран Сассо, измеренные с помощью LVD // ЖЭТФ. — 2023. — Т. 164, вып. 3 (9). — С. 386–395. DOI: 10.31857/S0044451023090079
47. N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, N. A. Filimonova, I. R. Shakiryanova, and V. F. Yakushev (on behalf of the LVD Collaboration) Lunar-Monthly Variances in the Background Gamma-Quanta Measured at the LVD // Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — V. 86, No. 6. — P. 1014–1020. DOI: 10.1134/S1063778824010046
48. В.Ф. Якушев, Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, Е.А. Добрынина, Р.И. Еникеев, Н.А. Филимонова, И.Р. Шакирьянова (и LVD Коллаборация)
Частотно-временной анализ измерений радоновых выбросов в подземной лаборатории LNGS, измеренных детектором LVD // ЖЭТФ. — 2024. — Т. 166, вып. 3(9). — С. 330–339. DOI: 10.31857/S0044451024090049
49. Агафонова Н. Ю., Добрынина Е. А., Филимонова Н.А., Шакирьянова И.Р.
Корреляционный анализ концентрации радона, измеренного по данным LVD, и данных давления в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) // LIX Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники: материалы конференции. Москва, РУДН, 22–26 мая 2023 г. – Москва:РУДН, 2023. – 343 с.: ил. (ISBN 978-5-209-12214-2) стр. 108-113
50. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, С. В. Ингерман, О. Ю. Слуцкая, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев (от имени коллаборации LVD)
Корреляционный анализ между скоростью счета гамма-квантов на LVD от естественной радиоактивности и атмосферным давлением // Ядерная Физика. – 2024. в печати

51. *Aglietta M. et al.* The Most Powerful Scintillation Supernova Detector LVD // *Nuovo Cimento A.* — 1992. — 105A. № 12. — С. 1793 – 1804.
52. *Catalano P.G., Cavinato G.P., Salvini F., Tozzi M.* Analisi strutturale nei laboratori dell'INFN del Gran Sasso d'Italia // *Mem. Soc. Geol. It.* — 1986. — Т. 35 (2). — С. 647-655.
53. *Воеводский А.В., Дадыкин В.Л., Ряжская О.Г.* Жидкие сцинтилляторы для больших сцинтилляционных счетчиков // *ПТЭ.* — 1970. — N1. — С. 85.
54. *Ряжская О.Г., Степанец Л.Н.* Исследование послеимпульсов, сопровождающих основной сигнал в фотоумножителях // *ПТЭ* — 1975. — №5. — С. 174-176.
55. *Агафонова Н. Ю., Бояркин В. В., Дадыкин В. Л. и др.* Поиск нейтринного излучения от сверхновых с помощью детектора LVD// *Известия РАН. Серия Физическая.* — 2009. — Т. 73. № 5. — С. 688–690. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_12136905_57032143.pdf
56. *Н Агафонова Н. Ю., Бояркин В. В., Дадыкин В. Л. и др.* Поиск различных типов нейтрино от коллапсирующих звезд с помощью детектора LVD// *Известия РАН. Серия Физическая.* — 2011. — Т. 75. № 3. — С. 445–447. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_16311642_74347970.pdf
57. *Agafonova N.Y. et al. (The LVD Collaboration).* Implication for the core-collapse supernova rate from 21 years of data of the Large Volume Detector // *The Astrophysical Journal.* — 2015. — Т. 802:47 — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/802/1/47/pdf>
58. *Хальчуков Ф.Ф.* Поиск антинейтринного излучения от Солнца на подземных сцинтилляционных детекторах LSD и LVD. Диссертация кан. физ.-мат. наук (ИЯИ РАН, Москва, 1996), — С. 88.
59. *Сивухин. Д. В.* Общий курс физики. 3-е издание, стереотипное. М.: Физматлит. — 2002. — Т. V. Атомная и ядерная физика. — 784 с.
60. *Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина.* — М.: Атомиздат, — 1976. — С. 872—873. — 1008 с.

61. *Копылов А.В., Череховский В.И.* Естественная радиоактивность конструкционных материалов // Препринт. — 1989. — П-0604, АН СССР ИЯИ. — 11с.
62. Fattori S. Study of radioactive background minimization for a 1 ton module of the xenon experiment. //Ph.D. Thesis, L'Aquila University — 2010.
63. 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.
64. *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>
65. *Агафонова Н.Ю., Добрынина Е.А., Мануковский К.В., Юдин А.В.* Источники фоновых событий в детекторе LVD // Ядерная физика. — 2025. принята к публикации 20.09.2024
66. *Ivanchenko V. N. (for Geant4 Collab.)* // Nucl. Instrum. Methods A — 2003. — V. 502. — P. 666.
67. Добрынина Е. А. Дипломная работа. МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, каф. космических лучей и физики космоса, 2001.
68. *Richon P., Perrier F., Pili E., Sabroux J.* Detectability and significance of 12 hr barometric tide in radon-222 signal, dripwater flow rate, air temperature and carbon dioxide concentration in an underground tunnel // Geophys. J. Int. — 2009. — Т.176 (3) — С. 683-694.
69. *Eff-Darwich A., Martín C., Quesada M., de la Nuez J., Coello J.* Variations on the concentration of ^{222}Rn in the subsurface of the volcanic island of Tenerife, Canary Islands// Geophys. Res. Lett. — 2002. — Т.29. — С. 2069. —DOI: 10.1029/2002GL015387
70. *Eff-Darwich A., Vinas R., Soler V., de la Nuez J., Quesada M.L.* Natural air ventilation in underground galleries as a tool to increase radon sampling volumes for geologic monitoring // Radiat. Meas. — 2008. — Т. 43. — С. 1429-1436.

71. *Badino G., Bologna G.F., Castagnoli C. et al.* The 90 ton Liquid Scintillation Detector in the Mont Blanc Laboratory. // *Il Nuovo Cimento*. — 1984. — Т. 7С. — С.573-583.
72. *Дадыкин В.Л., Зацепин Г.Т., Корчагин В.Б. и др.* О регистрации редкого события детектором нейтринного излучения под Монбланом 23 февраля 1987г. // *Письма в ЖЭТФ*. — 1987 — Т. 45, вып. 10. — С. 464-466.
73. Руководство по эксплуатации и паспорт.
URL:https://www.eksis.ru/upload/manuals/ivtm-7_m-1...7.pdf/ (дата обращения 10.01.2019)
74. Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды.-
URL:<https://cds.climate.copernicus.eu> (дата обращения 16.08.2023)
75. *G. Etiope and G. Martinelli* Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview // *Phys. Earth Planet. Inter.* — 2002. — V. 129. — P. 185.
76. *Kuang, X., J. J. Jiao, and H. Li* (2013) Review on airflow in unsaturated zones induced by natural forcings // *Water Resour. Res.* — 2013. — V. 49. — P. 6137-
77. *Стенькин Ю. В., В. В. Алексеенко В.В., А. В. Игошин А. В., и др.* Подземная физика и нелинейный задержанный барометрический эффект гамма-фона // *ЖЭТФ*. — 2020. — Т. 158. — С. 469. —DOI: 10.31857/S0044451020090059. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_43864994_18091103.pdf
78. *Bezrukov L. B., Karpikov I. S., Kazalov V. V. at al.* Study of the Delayed Pumping Effect in an Underground Laboratory by Correlation Analysis of Radon and Air Ion Concentrations// *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2024. — Т. 64, No. 1. — С. 102–111
79. Мельхиор П. Земные приливы. — М.: Мир, 1968. — 482с.