



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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
к. ф. - м. н. Агафонова Н. Ю.

Москва, 2024

Введение

Глава 1 Описание эксперимента LVD и метод регистрации фоновых гамма-квантов

1.1 Описание установки LVD

1.2 Фон естественной радиоактивности в зале эксперимента LVD, происхождение радона

1.3 Непрерывный канал регистрации низкоэнергетических импульсов и отбор счетчиков

1.4 Обработка и представление данных

1.5 Выводы

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

2.2 Соотношение между данными LVD и радонометра

2.3 Форма “радонового” пика на LVD

2.4 Вентиляция в зале эксперимента LVD

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

2.6 Сравнение с LSD

2.7 Выводы

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

3.1 Измерения температуры, влажности и давления в экспериментальном зале

3.2 Сравнение данных LVD и термогигрометра

3.3 Связь давления в подземном зале с атмосферным давлением

3.4 Барометрический эффект на LVD

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

3.6 Выводы

Глава 4 Сезонные (годовые) и лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов на LVD

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

4.2 Сезонные вариации

4.3 Лунно-месячные вариации

4.4 Выводы

Заключение

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 двойной безнейтринный бета-распад. Эксперименты, проводимые в LNGS, такие как DAMA/LIBRA, XENON, CRESST, Borexino, предназначенные для поиска редких событий побуждают более детально исследовать вариации низкоэнергетического фона под землей. В лаборатории Гран Сассо в Италии разрабатываются эксперименты NEWSdm, Legend и учет фона до сих пор является сложной экспериментальной задачей. Сезонные вариации потока мюонов, нейтронов и гамма-квантов могут имитировать вариации потока темной материи, что побуждает более детально изучать фон под землей.

Во всем мире ведутся исследования по изучению поведения радоновых полей. В ряде работ были получены указания на связь эманации радона с готовящимися и происходившими 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. Изучения выбросов радона при непрерывном мониторинге скорости счета гамма-квантов во время землетрясений может создать предпосылки для разработки методики определения предвестников сейсмо-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

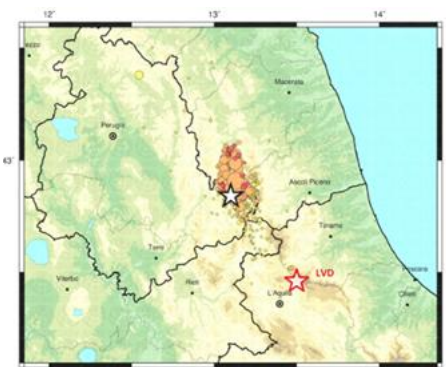
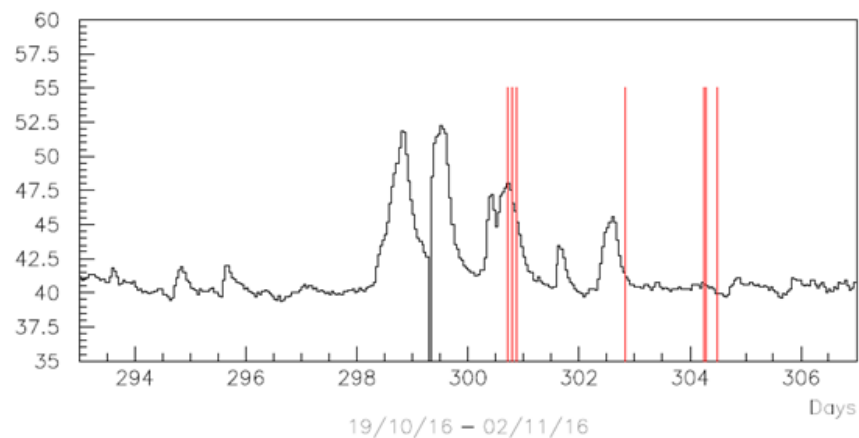
Научная новизна работы состоит в использовании большого сцинтилляционного детектора LVD в низкофоновой подземной лаборатории, информация, с которого позволяет определять эманацию радона из грунта с большой точностью. Месторасположение детектора – горный массив Гран Сассо – сейсмоактивный район Италии. 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 дочерних ядер. Уникальность метода и большая статистика позволяет разработать новый метод определения изменения эманации радона и разделить источники его вариации.

Начало исследования. Землетрясения.

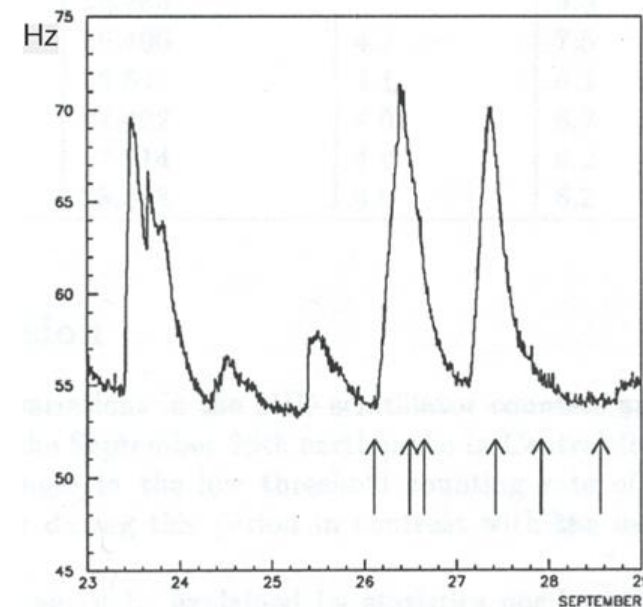
На возможности установки LVD для изучения вариаций концентрации радона под землей было обращено внимание сотрудниками коллаборации LVD после обнаружения аномального повышения фонового темпа счета детектора во время сильного землетрясения в Центральной Италии в сентябре 1997 года. Эпицентр толчков находился в Перуджи, примерно в 100 км от установки.

После похожего увеличения темпа счёта 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.

При деформациях земной коры увеличивается количество микротрещин, возникает напряжение и усиливается вибрация грунта, что приводит к значительному повышению концентрации радона.



Скорость счета установки LVD во время землетрясения в Италии в 2016 году.
Красные линии - моменты сейсмических толчков с магнитудой >4.5.



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

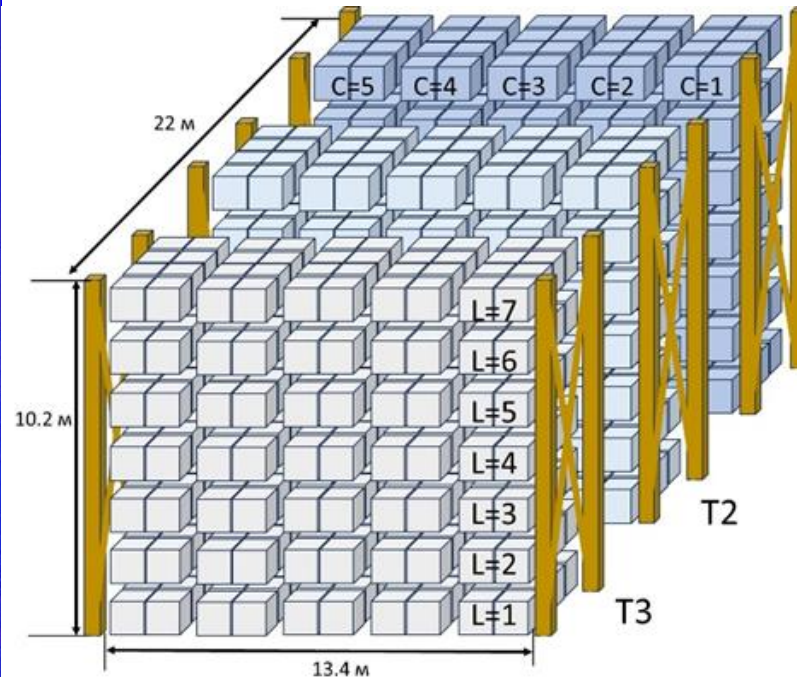
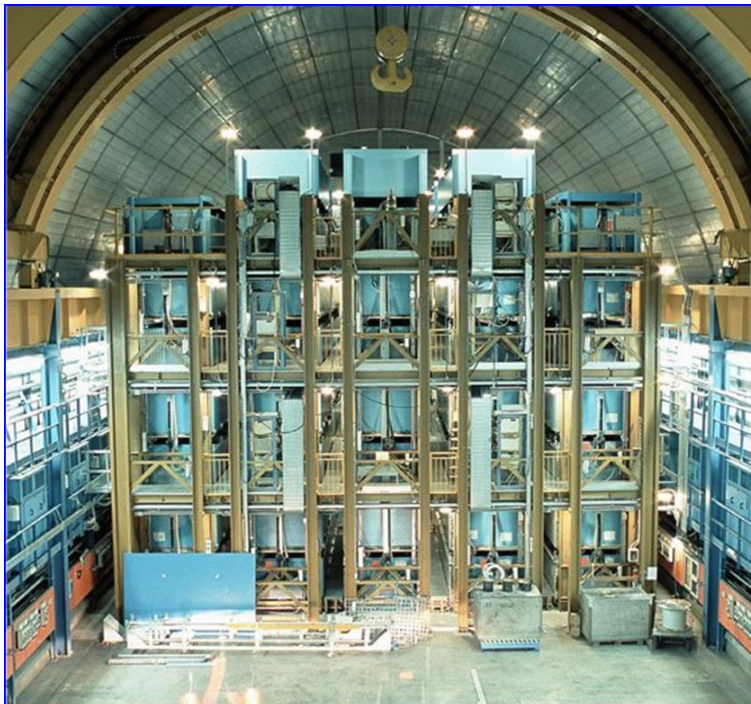
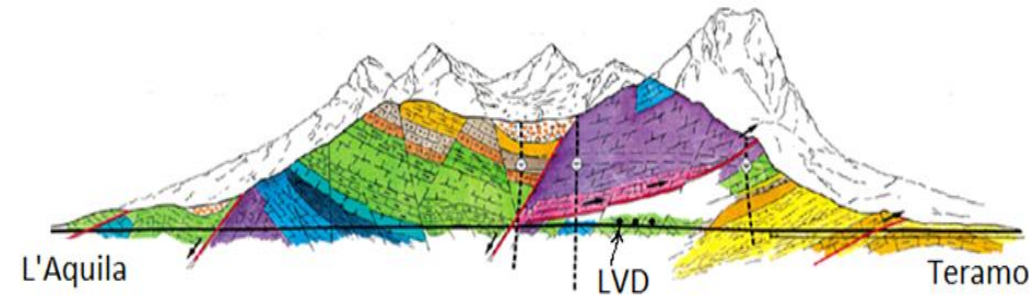
Прогноз землетрясения предполагает предсказание, с известной достоверностью, трёх характеристик:

- ✓ места очага землетрясения,
- ✓ времени
- ✓ силы.

Описание детектора LVD

Установка LVD (**Large Volume Detector**) работает с 1992 года. Она 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.

Основная задача — поиск нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёздных ядер в нашей Галактике.



Длина ×Ширина×Высота	22×13.4×10.2 м ³
Масса железа	1020 тонн
Масса сцинтиллятора	1008 тонн
Число сцинт. счетчиков	840
Число PMTs (ФЭУ)	2520
Средняя глубина (минимальная)	3620 м в. э. 3000 м в. э.

Детектор имеет модульную структуру: счётчики помещены по 8 штук в металлические модули-контейнеры (портатанки).

Общий вид установки LVD и схема расположения портатанков.

Счетчик и система регистрации

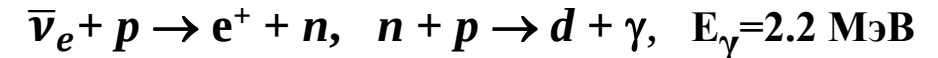


Счётчик размером $100 \times 100 \times 150 \text{ см}^3$ сделан из нержавеющей стали толщиной 4 мм и заполнен сцинтиллятором на основе уайт-спирита (C_nH_{2n} , где $n \approx 9.6$).

На верхней грани установлены три спектрометрические фотоумножителя с диаметром фотокатода 15 см (ФЭУ-49Б или ФЭУ-125), включенные на совпадение.

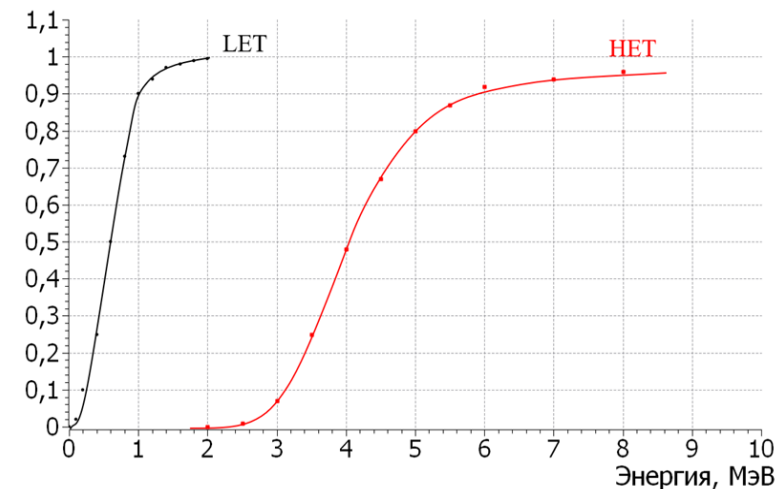
Информация с каждого счетчика считывается независимо. Импульсы с каждого ФЭУ усиливаются и дискриминируются по двум порогам: верхнему (HET – High Energy Threshold) и нижнему (LET – Low Energy Threshold).

Счетчик имеет двойную пороговую систему регистрации. Она разработана для детектирования нейтринного излучения от коллапсов звезд в реакции обратного бета-распада на водородосодержащем сцинтилляторе.



Триггер (трехкратное совпадение импульсов HET) в интервале 250 нс) открывает в счетчиках временные ворота длительностью 1 мс: в это время регистрируются импульсы трехкратного совпадения LET.

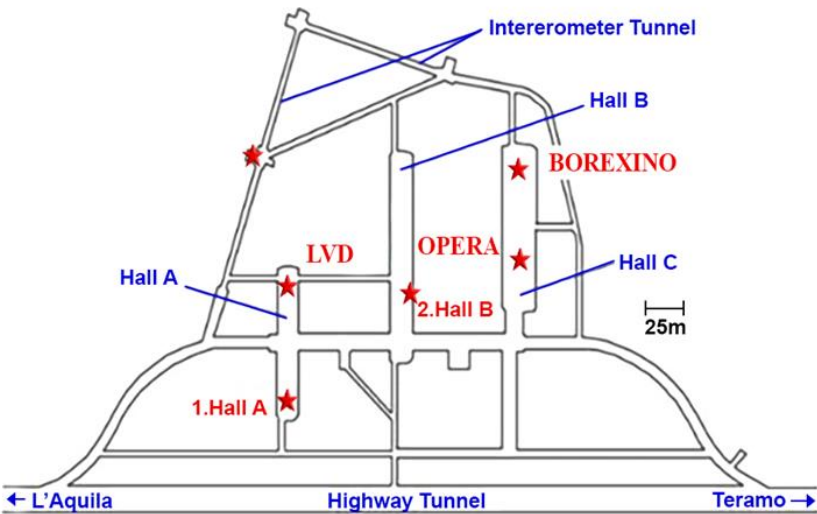
Параллельно, для непрерывного наблюдения за фоном низкоэнергетических импульсов, существует система регистрации, не зависящая от прихода триггерных частиц высокой энергии (**scaler**).



$$E_{\text{HET}} = 5 \text{ МэВ}$$

$$E_{\text{LET}} = 0.5 \text{ МэВ}$$

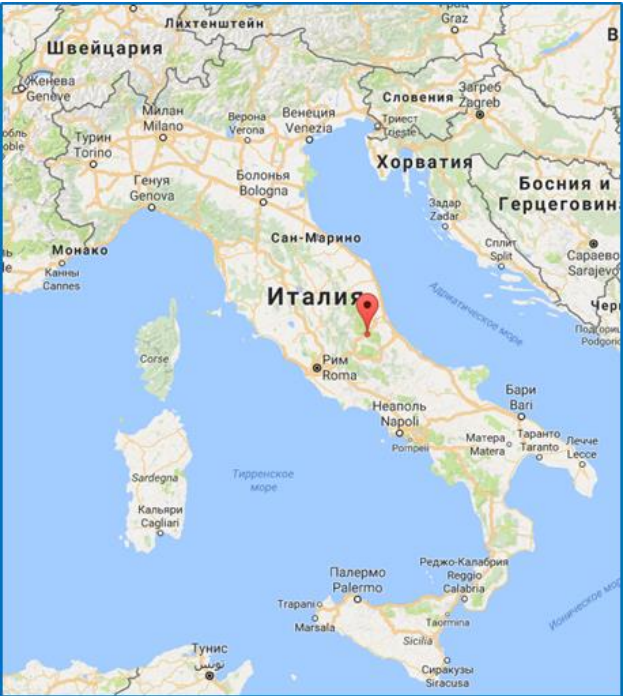
Экспериментальный зал LVD



Экспериментальные подземные залы лаборатории Гран Сассо располагаются в 50-100 метрах от двух параллельных транспортных туннелей (около 10 км каждый), соединяющих центральную часть Италии с Адриатическим побережьем.

Зал эксперимента LVD (Hall A) имеет объём 24000 м³, из них около 2000 м³ занимает оборудование. Ввоз-вывоз оборудования производится через двое ворот. При закрытых воротах и блокированных затворах принудительной вентиляции зал практически герметичен.

Приток свежего воздуха обеспечивается приточной вентиляцией с мощностью 8000 м³/час. Вентиляция работает постоянно.



Координаты LNGS

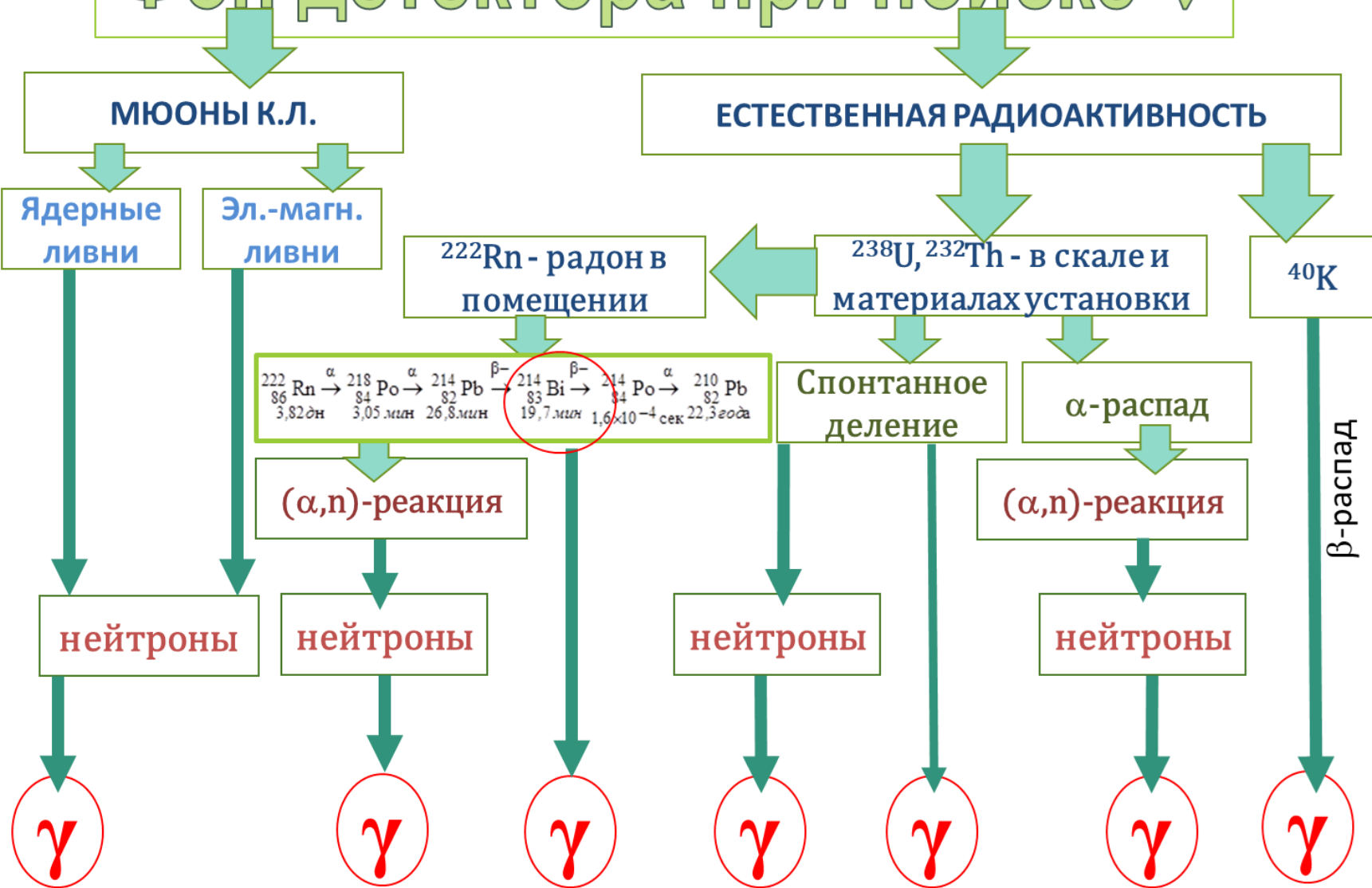
Long=13.57°в.д.

Lat=42.45°с.ш.

Горный массив Гран Сассо состоит из старых осадочных пород, содержащих в основном CaCO_3 и MgCO_3 со средней плотностью $\rho \sim 2.6 \text{ г/см}^3$.

Элемент	Массовая доля
H	0.03
C	12.17
O	50.77
Mg	8.32
Al	0.63
Si	1.05
K	0.1
Ca	26.89

Фон детектора при поиске ν



Источники фона в подземных экспериментах:

1. Радиоактивность окружающих горных пород.
2. Присутствие радиоактивных примесей в материале детекторов и их защиты.
3. Мюоны космических лучей и их вторичные частицы.
4. Содержащийся в воздухе и воде радиоактивный газ радон ^{222}Rn и продукты его распада.

$E_\gamma < 10$ МэВ

$E_\gamma < 10$ МэВ 0.6–2.4 МэВ

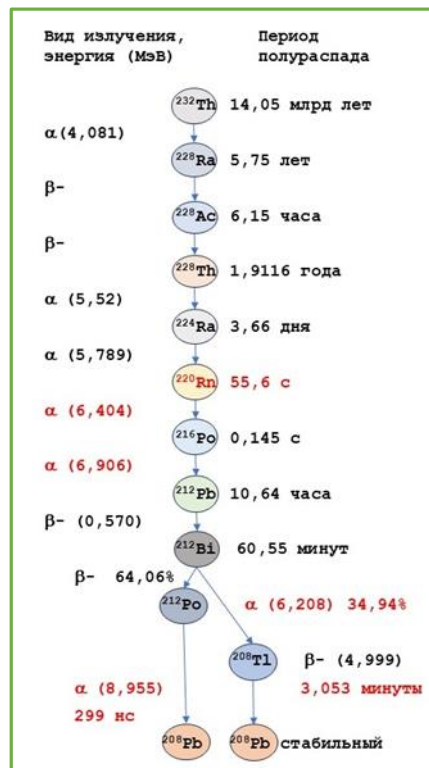
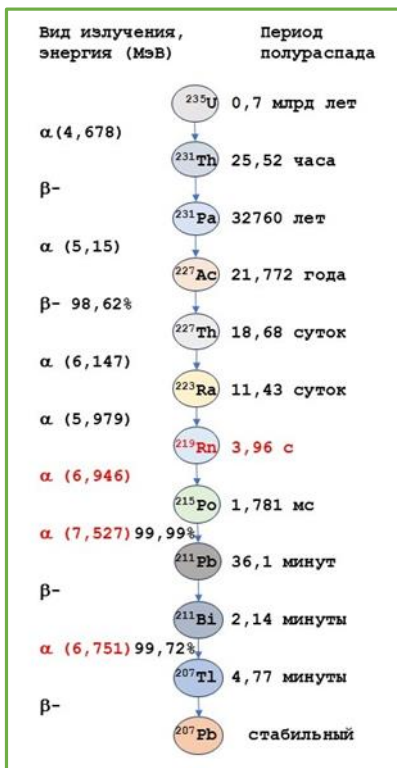
$E_\gamma < 10$ МэВ

3–10 МэВ

$E_\gamma < 10$ МэВ

1.4 МэВ

Происхождение радона



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.

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.

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

Содержание ²³⁸U, ²³²Th и ⁴⁰K в породе и материалах детектора

Концентрации ²³⁸U, ²³²Th и ⁴⁰K в образцах породы зала А были измерены в 1985 году.

E. Belotti, M.Burashi, E. Fiorini and C. Liguori. New Measurement of rock contaminations and neutron activity in the Gran Sasso tunnel.

Preprint INFN/TC-85/19 14 Ottobre 1985

Место взятия пробы	²³² Th	²³⁸ U	⁴⁰ K	²¹⁴ Pb
Зал А N1, Бк/кг (инфильтрат)	8.8 ±0,3	84.7 ±8,4	224 ±6	41.9 ±0.6
Зал А N2, Бк/кг (инфильтрат)	7.7 ±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 ±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

Содержание ²³⁸U, ²³²Th и ⁴⁰K в основных конструкционных материалах счетчика установки LVD.

А.В. Копылов, В.И. Череховский "Естественная радиоактивность конструкционных материалов", П-0604, АН СССР ИЯИ, 1989, 11с.

	²³⁸ U, г/г	²³² Th, г/г	⁴⁰ K, г/г
стекло ФЭУ-49Б	(6.4±1.8)×10 ⁻⁷	(11±3)×10 ⁻⁷	(4.9±1.0)×10 ⁻⁴
нерж. сталь	<9.7×10 ⁻⁹	(2.9±2.3)×10 ⁻⁹	
сцинтиллятор	≤10 ⁻¹⁰		

Корпус счетчиков установки LVD 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. Таким образом, можно оценить содержание ²³⁸U в одном счетчике. Оно составляет примерно 5×10⁻³ г.

Концентрация ^{222}Rn в экспериментальном зале

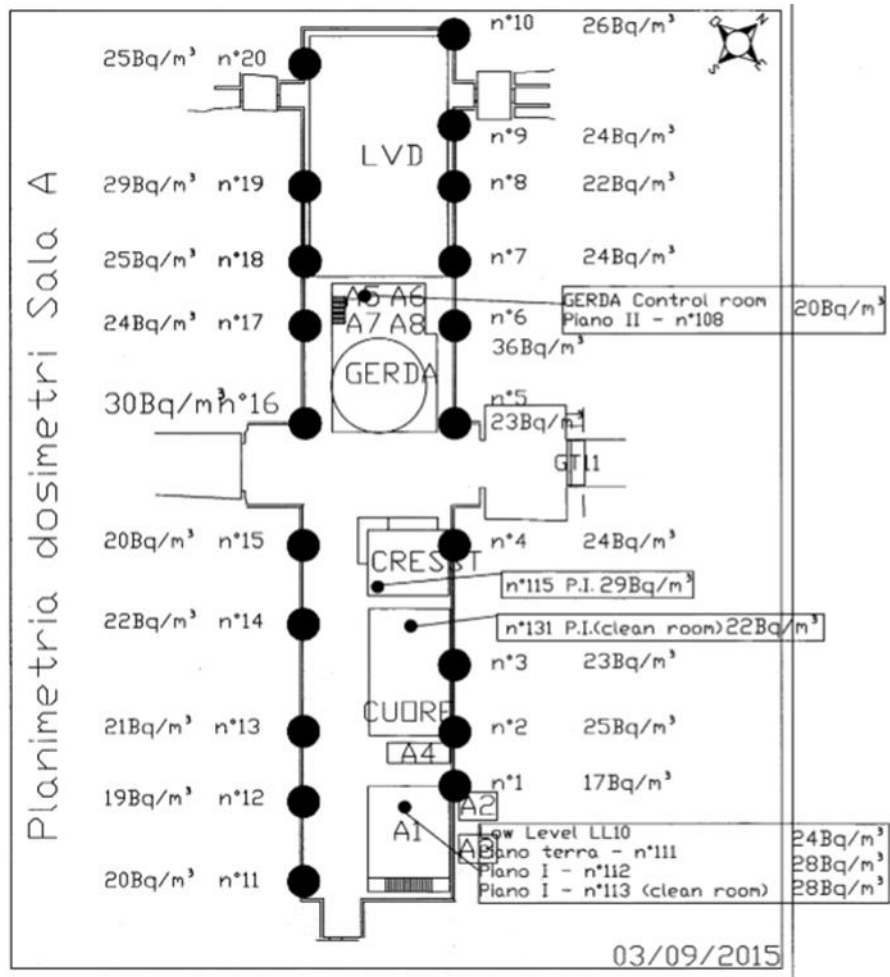


Схема зала А в 2015 году с замерами концентрации радона дозиметрическими службами.

Концентрация ^{222}Rn в разных подземных помещениях лаборатории Гран Сассо зависит от концентрации урана и тория в горной породе, от качества изоляции помещения от скалы и устройства системы вентиляции.

В зале эксперимента LVD постоянно работает принудительная вентиляция, которая обеспечивает приток свежего воздуха с низким содержанием радона.

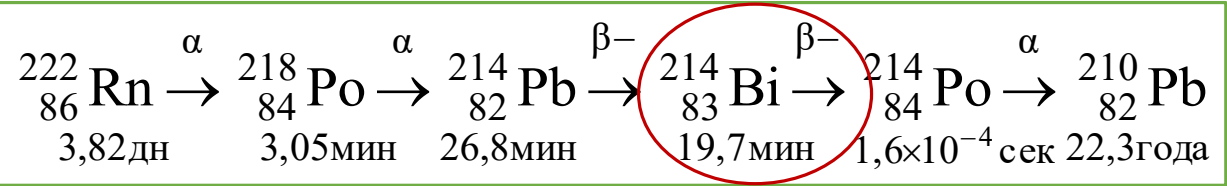
Средняя концентрация ^{222}Rn в разных помещениях Лаборатории Гран Сассо по данным дозиметрических служб	
Зал А	26 Бк/м³
Зал В	43 Бк/м³
Зал С	104 Бк/м³

Факторы, влияющие на изменение концентрации радона в подземных помещениях:

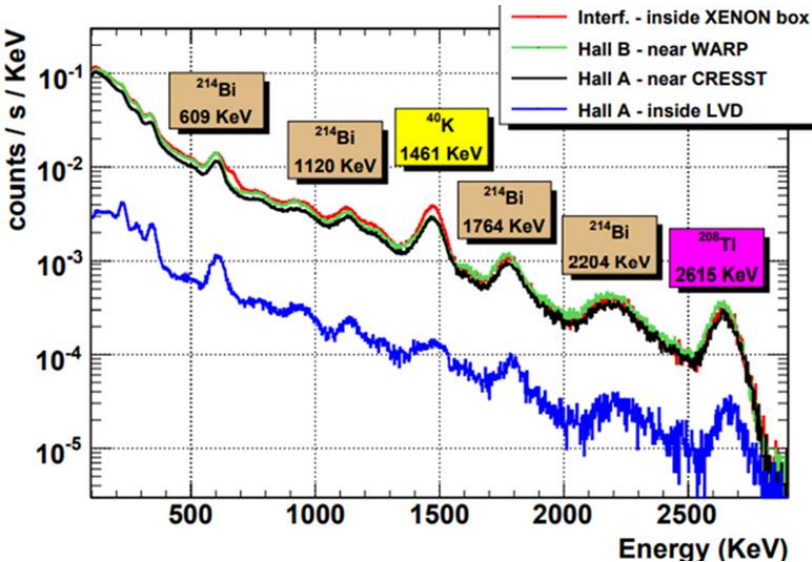
1. Устройство и режим работы вентиляции.
2. Вибрация грунта (прохождение машин по транспортному туннелю, работа техники и т.д.).
3. Изменение насыщения водой скального грунта (при таянии снегов, обильных осадках).
4. Приливные силы, связанные с лунным циклом.
5. Сейсмическая активность, деформации земной коры, возникновение напряжений в грунте.

Метод регистрации ^{222}Rn на LVD

Наиболее вероятная следующая цепочка радиоактивных распадов ^{222}Rn :



Основной источник гамма-квантов – ядро $^{214}_{83}\text{Bi}$



Спектр гамма-квантов, измеренный в разных точках лаборатории Гран Сассо группой эксперимента XENON. S.Fattori, «Study of radioactive background minimization for a 1 ton module of the xenon experiment.» //Ph.D.Thesis, L’Aquila University, 2010.

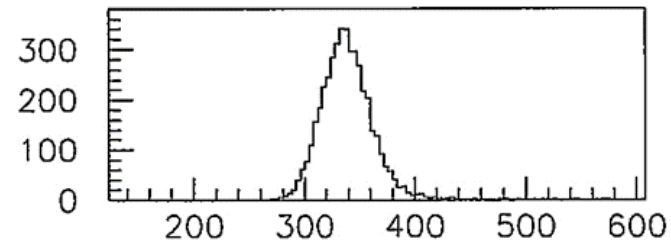
Энергия γ -кванта, МэВ	Количество γ -квантов на 100 ядер ^{214}Bi	Эффективность регистрации, %
0.609	47	15
1.764	17	95
1.120	17	65
1.238	6	80
2.204	5	97
1.378	5	85
0.769	5	30
1.400	4	85
2.445	2	98

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

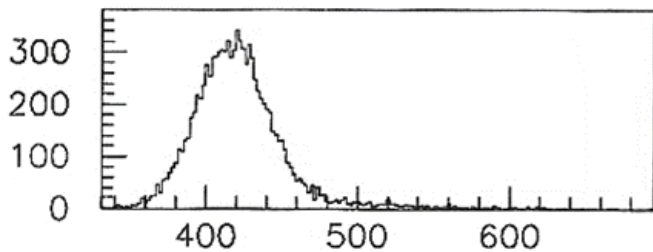
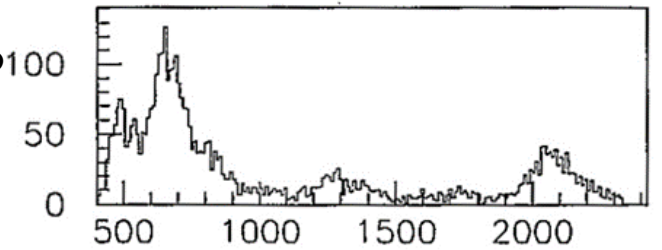
Нижний порог регистрации во внутренних счетчиках установки LVD – 0.5 МэВ, поэтому установка способна фиксировать весь диапазон гамма-квантов от дочерних ядер радона.

Непрерывный канал регистрации низкоэнергетичных импульсов и отбор счетчиков

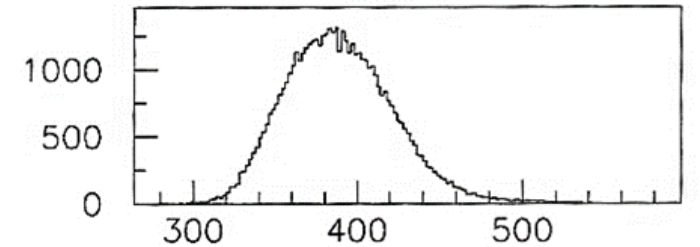
Система регистрации установки LVD содержит низкоэнергетичный канал, порог срабатывания которого 0.5 МэВ (для внутренних, защищенных от радиоактивности породы, счетчиков). Каждые 10 минут все счётчики детектора запускаются импульсом от генератора на регистрацию сигналов ($E > 0.5$ МэВ) в течение 10 секунд.



Примеры распределения скорости счета за 10 секунд хорошего счетчика (слева) и нестабильно работающего (справа).



Распределения скорости счета за 10 секунд одного и того же счетчика в 2001 (слева) и 2015 (справа) годах.



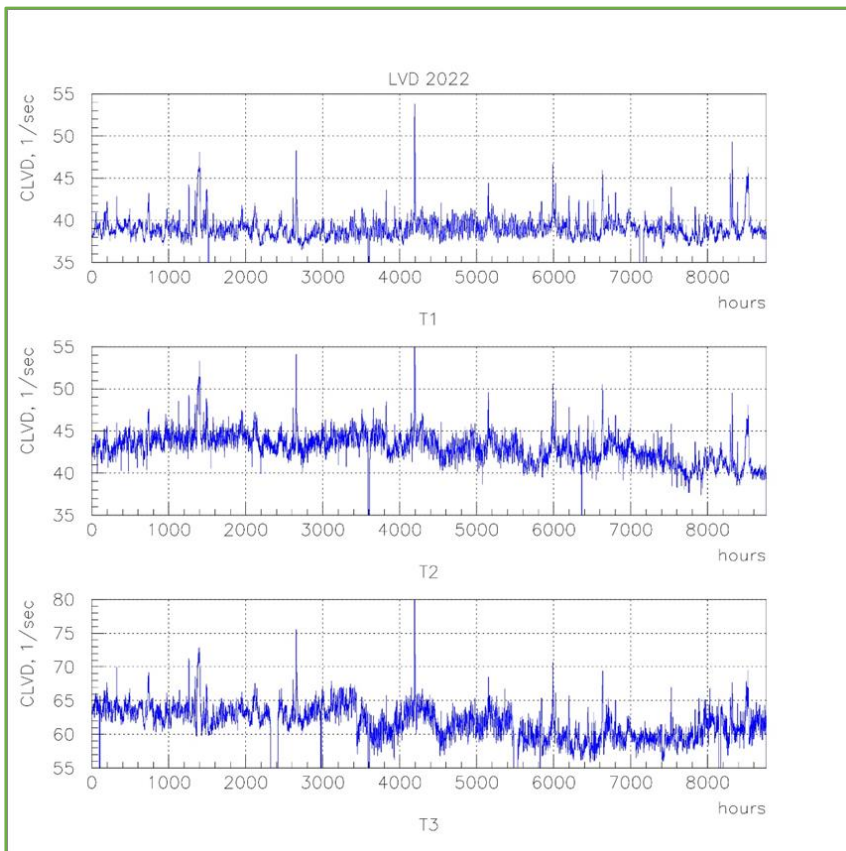
n174 331 694 1256 0 0 0

n174 264 595 1256 0 0 0

Для получения высокой статистики были определены **критерии для автоматического отбора счетчиков**:

1. Данные с каждого конкретного счетчика не используются только тогда, когда они в течение 10-ти секундного интервала выходят за определенные границы величины скорости счета для стабильно работающих счетчиков.
2. 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).

Обработка и представление данных



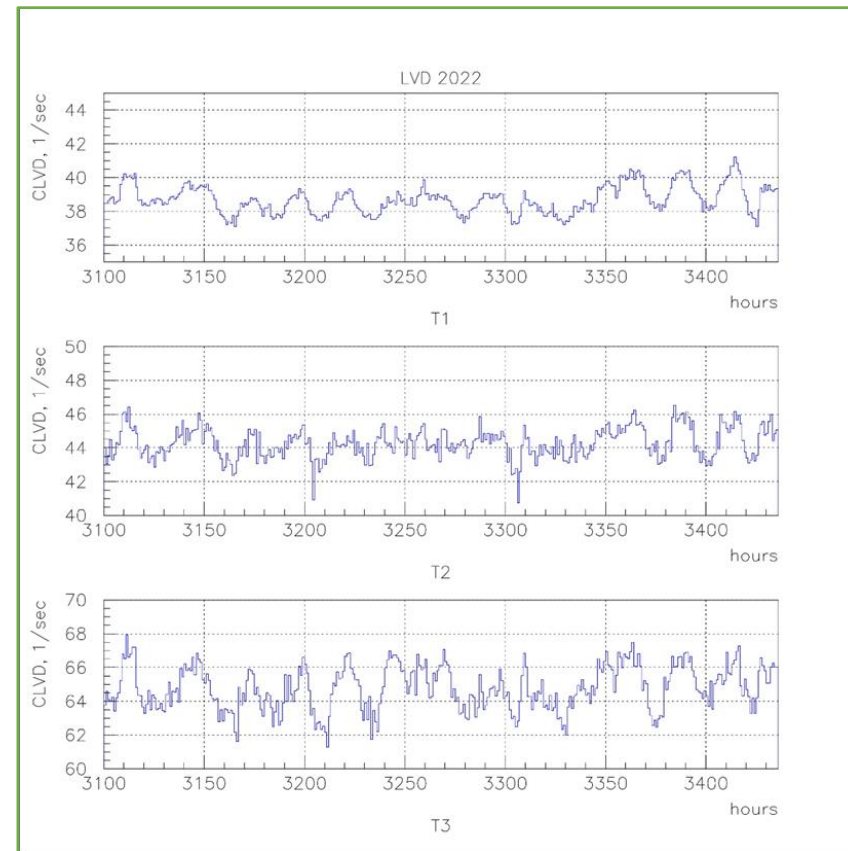
Пример графического представления данных на примере 2022 года (скорость счета гамма-квантов на установке LVD за год по каждой из трех башен).

Скорость счета низкоэнергетического канала измеряется автоматически каждые 10 минут. Сбор информации продолжается 10 секунд. Проводится отбор счетчиков по критериям, описанным выше.

Данные усредняются по часу и записываются в файл, содержащий дату, время и темп счета в герцах на один счетчик отдельно по каждой башне.

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 $\sim 0.3\%$.

Данные с 1992 по 2023 г. г. проанализированы и представлены в удобном формате.

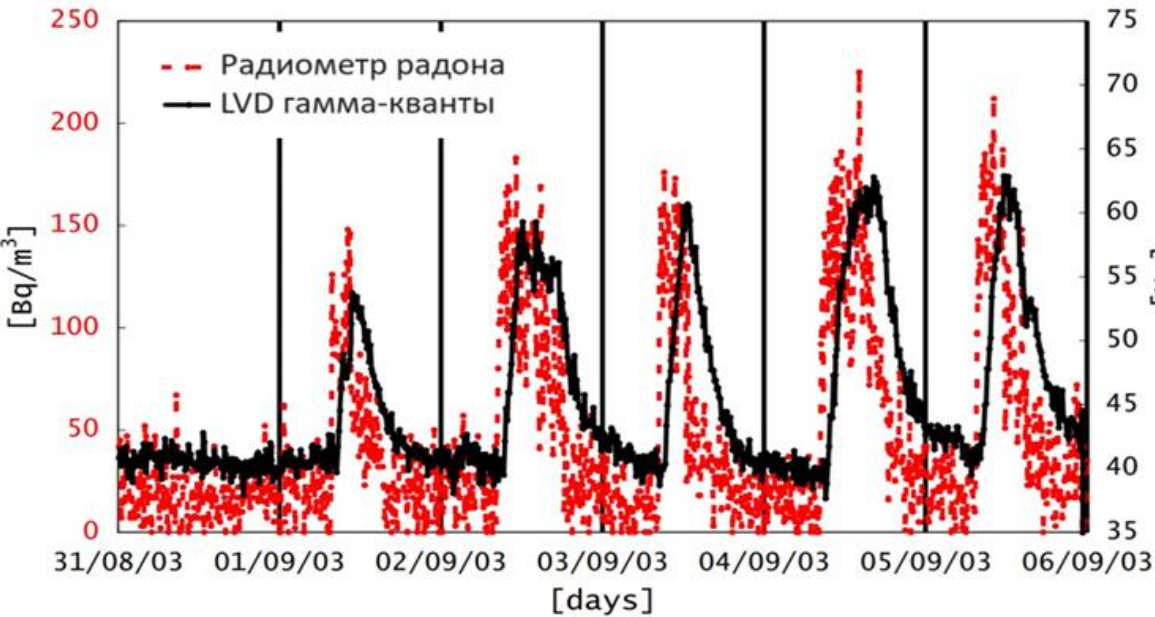


Пример графического представления данных на примере 2022 года (скорость счета гамма-квантов на установке LVD за две недели по каждой из трех башен).

Выводы к главе 1

1. Основными источниками фона по низкому порогу (> 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.
2. **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 $\sim 0.3\%$. Скорость счета гамма-квантов, регистрируемых в детекторе, усредняется по часу и приводится на один счетчик в секунду. Средняя скорость γ -квантов для внутренних счетчиков первой башни установки составляет около 45 импульсов/(сек $\times$ счетчик), около 50 импульсов/(сек $\times$ счетчик) – для второй и 70 – для третьей.**
3. **Определены критерии для автоматического отбора счетчиков LVD.** Основным критерием отбора является скорость счета импульсов в диапазоне от 200 до 2000 отсчетов в течение 10-ти секундного интервала для внутренних 240 счетчиков LVD. Наружные счетчики установки LVD, выполняющие роль защиты от естественной радиоактивности грунта исключаются из рассмотрения.
4. **Создан пакет программ для выделения и построения временных рядов скорости счета гамма-квантов, регистрируемых LVD, включающий автоматический отбор счетчиков и графическое представление результатов. Выполнена обработка данных с 1992 по 2023 г. г.**
5. 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.

Соотношение между данными LVD и радонметра



Сравнительные данные радонметра и LVD.

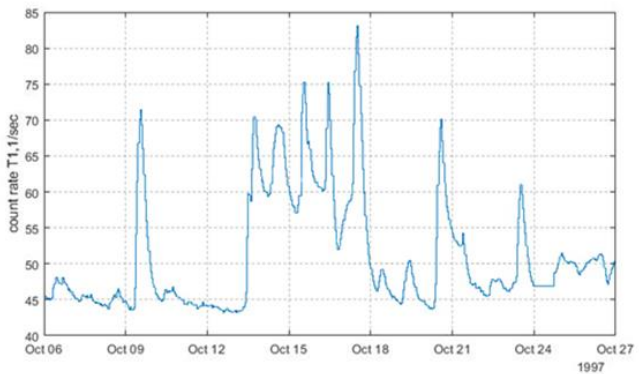
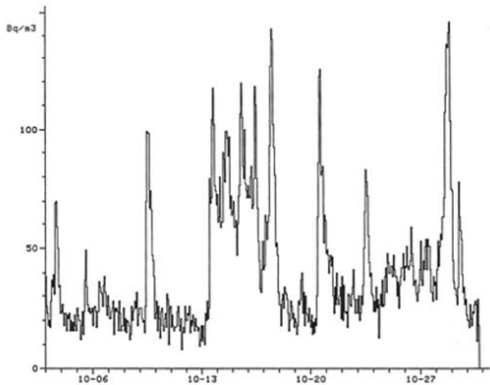
Между башнями установки LVD, установлен радиометр радона (радонметр), который проводит точечные замеры концентрации радона по альфа-активности дочерних ядер радона. Радонметр просматривает небольшой объем помещения и его показания сильно зависят от локальных выбросов радона.

Максимум корреляции получается при задержке данных радонметра примерно на час относительно данных LVD. Радонметр регистрирует альфа-частицы от распадов радона и полония, а LVD – гамма-кванты от висмута.

Bruno G., Menghetti H. Low energy background measurement (~ 0.8 MeV) with the LVD // Journal of Physics: Conference Series. — 2006. — T. 39. — C. 278. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/39/1/068>

Полный фоновый темп счёта установки LVD по нижнему порогу можно разделить на две составляющие:

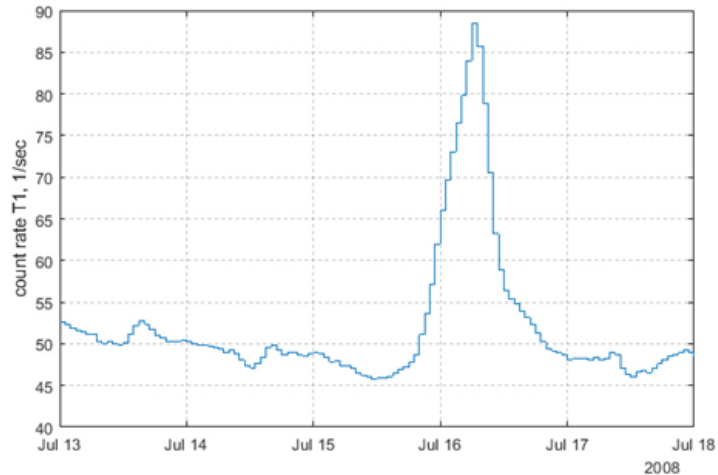
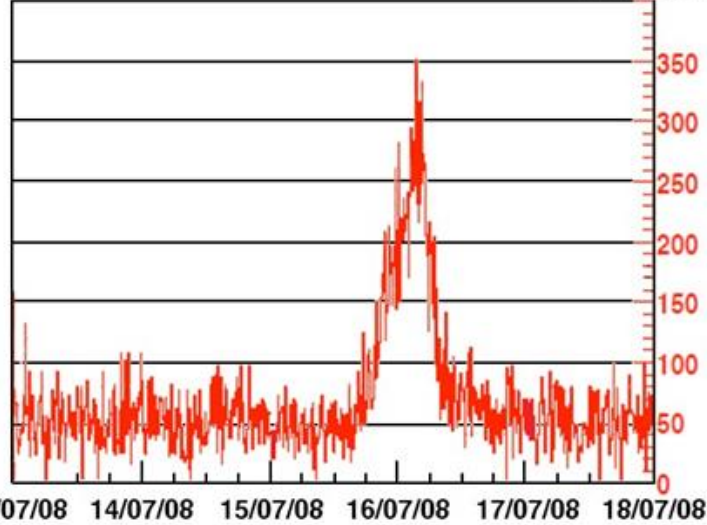
1. Переменную, связанную с изменением концентрации радона в подземном помещении.
2. Постоянную, связанную с собственной радиоактивностью материалов установки и окружающей среды (в основном, скальной породы). В постоянном фоне также присутствует доля от постоянной, равновесной концентрации радона.



Данные радонметра с 3.10.1997 по 31.10.1997 и данные LVD с 6.10.1997 по 27.10.1997.

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

RDM, Bq/m³

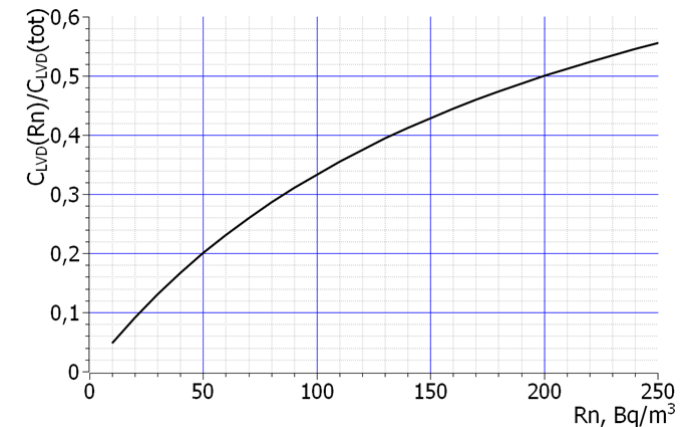


При концентрации радона в помещении равной 20 Бк/м³ на установке LVD будет зарегистрировано в среднем 2.6 ± 0.2 отсчета, обусловленных радоном, что составляет $6.2 \pm 0.5\%$ от общей скорости счета гамма-квантов на LVD.

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.

Полное число импульсов в секунду в одном счетчике: $C_{Rn} = 0.5 \times \rho_{Rn} \times (\epsilon \times N_\gamma) \times V$, 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. При концентрации радона в помещении равной 20 Бк/м³ на установке LVD должно быть зарегистрировано примерно 2.8 импульсов в секунду на счетчик.

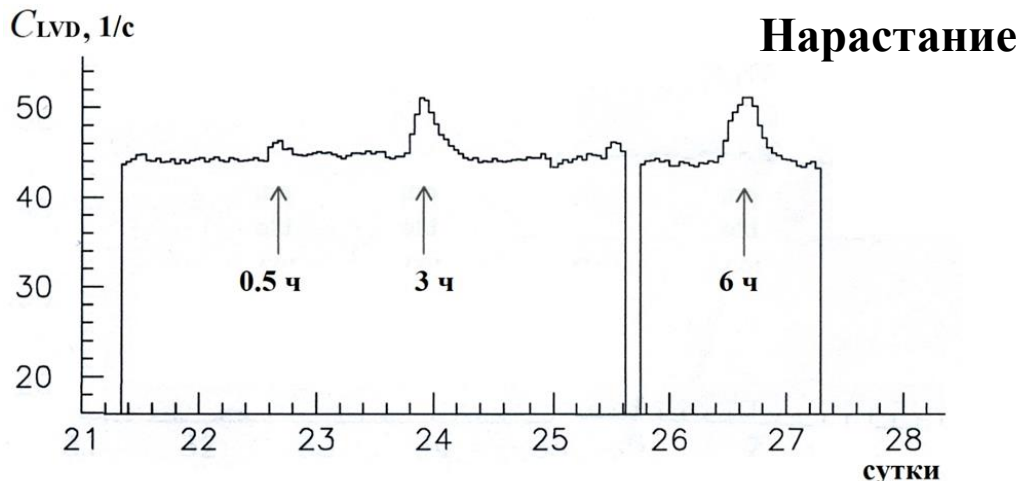
Отношение числа событий, обусловленных радоном в воздухе для разной концентрации радона, к полному числу событий от всей радиоактивности, полученное в результате Монте-Карло моделирования фоновых событий в детекторе от естественной радиоактивности грунта и материалов конструкции: 10% при 20 Бк/м³, 20% при 50 Бк/м³.



Данные радонметра и LVD (T1): 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.

Форма “радонового” пика на LVD

“Радоновым пиком” называется быстрое изменение концентрации радона в подземном помещении, где находится установка LVD.



Радоновые пики при открытых воротах (ноябрь 2000 года)

Через открытые ворота общей площадью 50 м² в экспериментальный зал впускался воздух из соседних неветилируемых помещений с повышенной концентрацией радона.

Ворота в экспериментальный зал открывались на фиксированное время: 0.5 часа, 3 часа и 6 часов.

Время нарастания величины C_{LVD} при этом составило: 3 часа - в первых двух случаях и 6 часов - в последнем. Отсюда можно заключить, что время перемешивания воздуха в зале около 3 часов.

Форма пика обусловлена инъекцией радона в атмосферу зала и его выдувом вентиляцией.

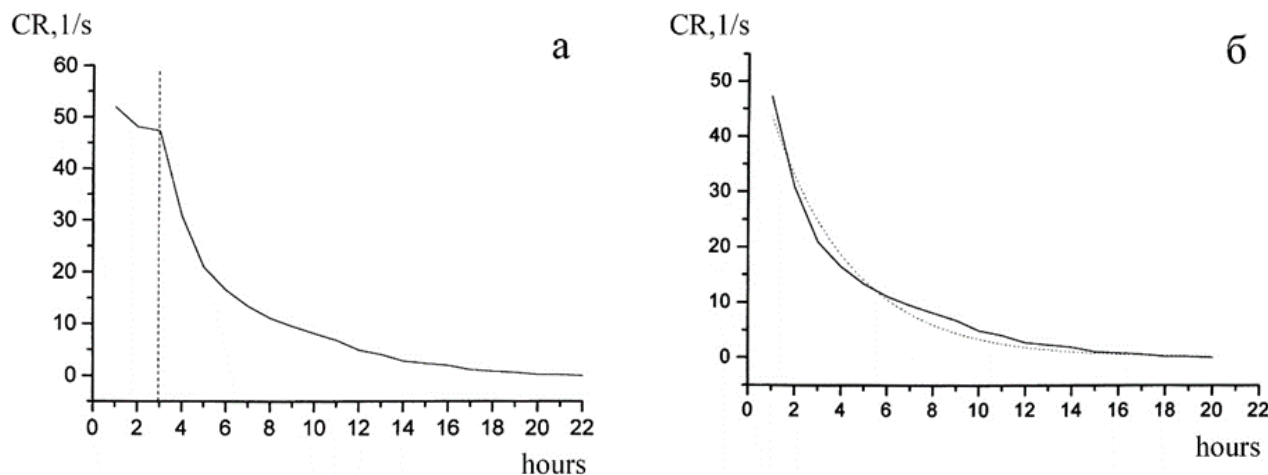
Определены параметры изменения величины C_{Rn} : **время нарастания** (фронт) от 3 до 10 часов и **экспоненциальный спад** длительностью до ~14 часов с показателем экспоненты $\tau \approx 3$ часа.

Спад

Спад концентрации радона в зале А за счет действия вентиляции :

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{F}{V}t\right) = C_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_v}\right), \text{ где } \tau_v = \frac{V}{F} = 2,75 \text{ часа.}$$

$V = 22000 \text{ м}^3$ - объем экспериментального зала А без оборудования
 $F = 8000 \text{ м}^3/\text{час}$ – поток нагнетаемого в зал наружного воздуха



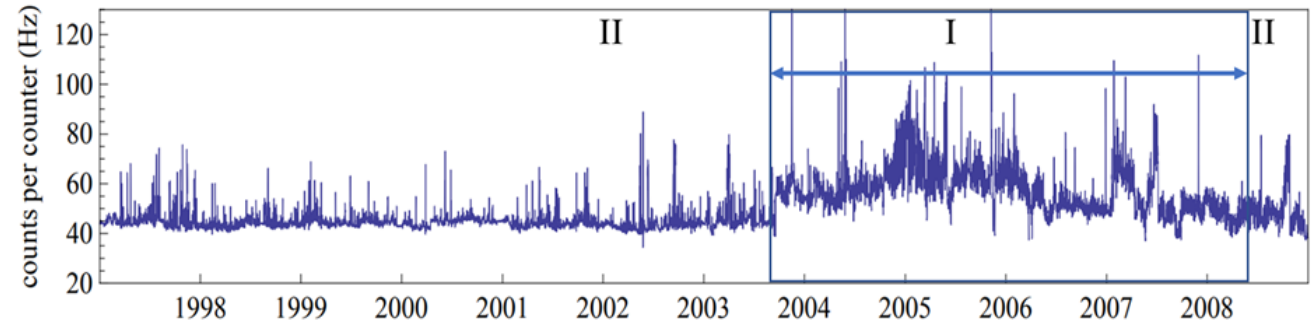
Форма спада усредненного пика на LVD - а, после излома - б.

Аппроксимация спада после излома функцией:

$$y = y_0 + A_1 \exp\left(-\frac{x-x_0}{t_1}\right), \text{ где } t_1 = 3.5 \text{ часа.}$$

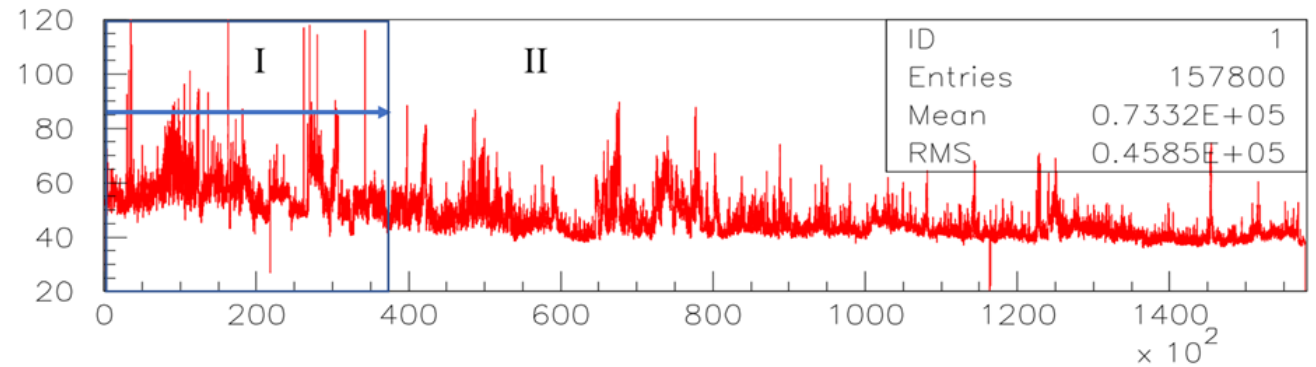
Вентиляция в зале эксперимента LVD

В подземном экспериментальном зале, где находится установка LVD работает приточная вентиляция с мощностью 8000 м³/час, которая нагнетает чистый воздух с поверхности. 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.



Скорость счета гамма-квантов на LVD за период с 01.01.1998 по 31.12.2008.

Данные из работы 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.



Скорость счета гамма-квантов на LVD за период с 01.01.2004 по 31.12.2021 (18 лет).

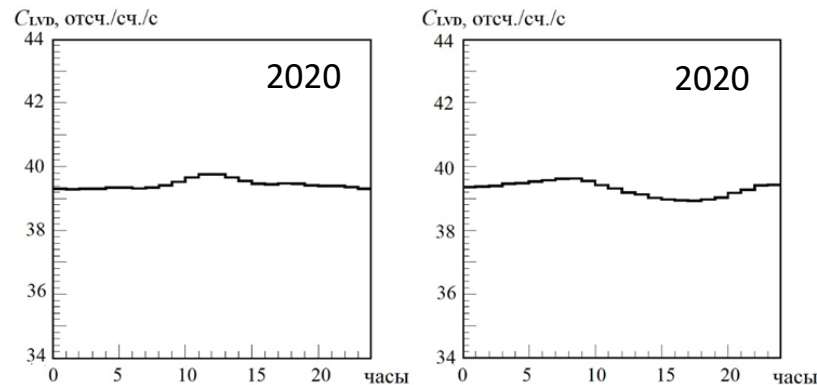
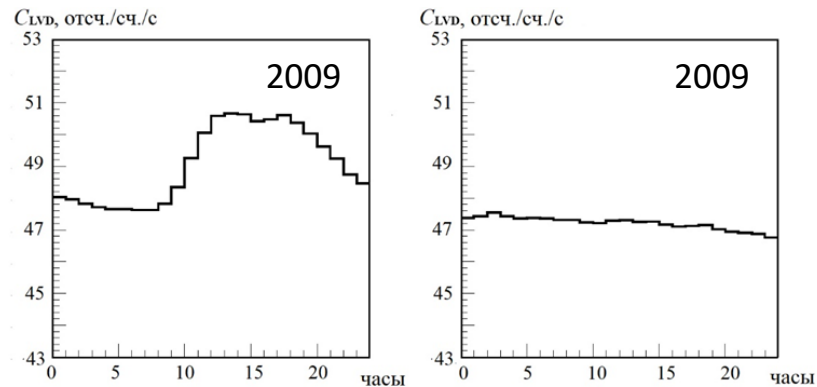
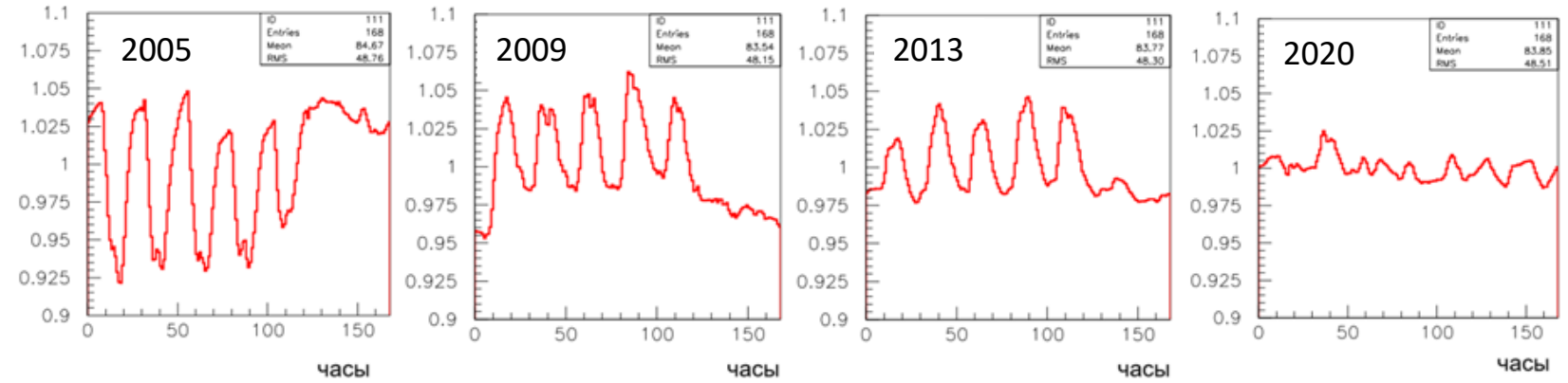
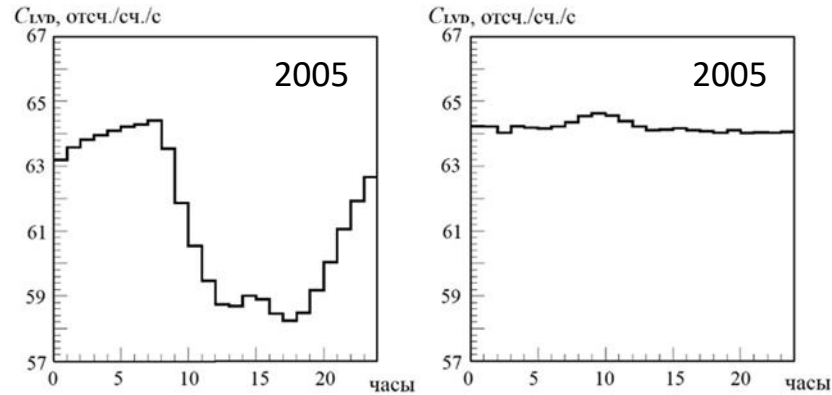
Данные настоящей работы, которые использовались при анализе периодических вариаций величины скорости счета LVD по нижнему порогу ($C_{LVD}(t)$). По оси абсцисс – часы с начала 2001 года.

Два периода работы установки, которые связаны с разной работой системы вентиляции в экспериментальном зале:

Период II со стандартной вентиляцией, описанной выше: с 1992 по 2004 год и с 2009 по настоящее время.

Период I, в который вентиляция отличалась от «обычной»: с 2004 до 2008 год. В период I велось активное строительство детектора Gerda, который находится рядом с LVD.

Суточные и недельные вариации скорости счета гамма-квантов на LVD



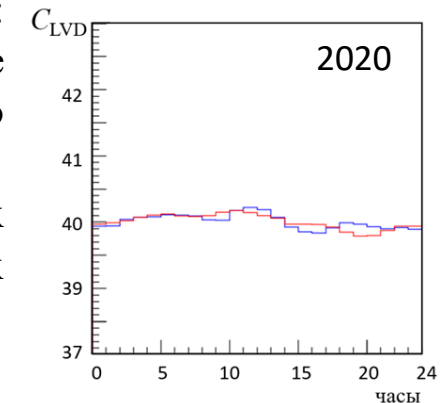
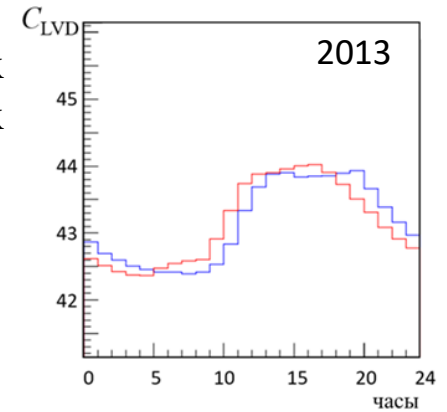
Суточные вариации $C_{LVD}(t)$ получены методом наложения эпох для рабочих дней с понедельника по пятницу и для выходных дней (суббота, воскресенье).

Можно выделить три периода с разным поведением:

1. Период I. Пример – 2005 год.
2. Период II (стандартная вентиляция). Примеры 2009 и 2013 г.г.
3. Период пандемии (Ковид-19). Пример – 2020 год.

Суточные вариации имеют техногенное происхождение: открывание и закрывание ворот в зал эксперимента в рабочее время, а также прохождение большегрузных машин по транспортному туннелю.

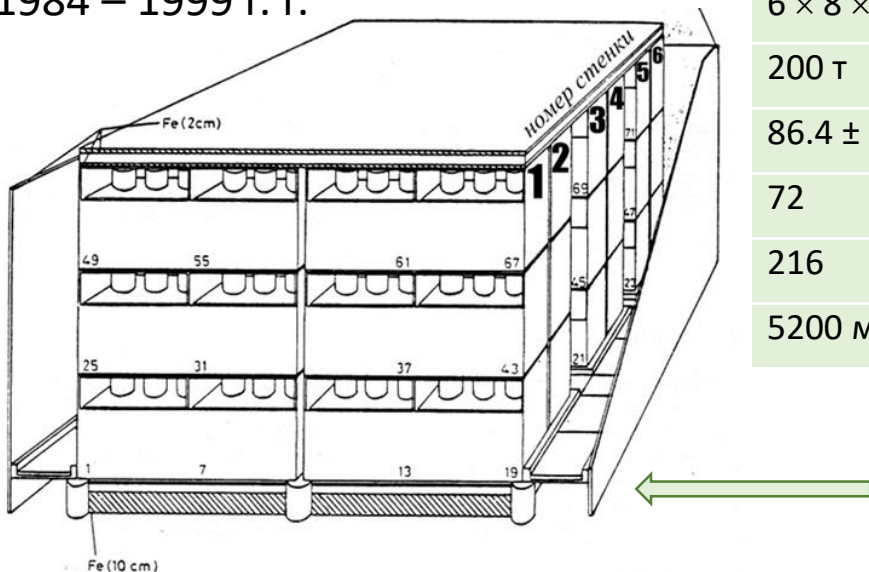
Подтверждением техногенного происхождения суточных вариаций $C_{LVD}(t)$ является сдвиг между распределениями летних и зимних периодов в данных за сутки.



ПОДЗЕМНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ LSD И LVD

Liquid Scintillation Detector (LSD)

1984 – 1999 г. г.

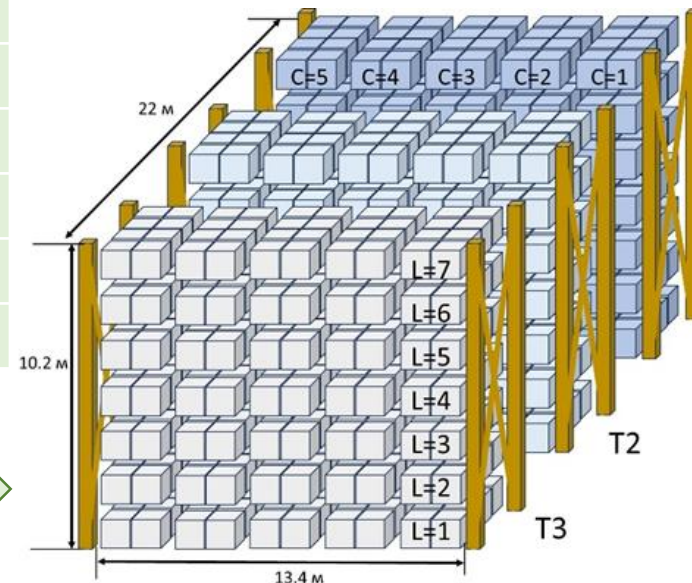


$6 \times 8 \times 5 \text{ м}^3$	Длина×Ширина×Высота	$22.7 \times 13.2 \times 10 \text{ м}^3$
200 т	Масса железа	1020 т
$86.4 \pm 0.5 \text{ т}$	Масса сцинтиллятора	1008 т
72	Число сцинт. счетчиков	840 (280 в 1997г.)
216	Число ФЭУ	2520
5200 м.в.э.	Средняя глубина	3620 м.в.э.

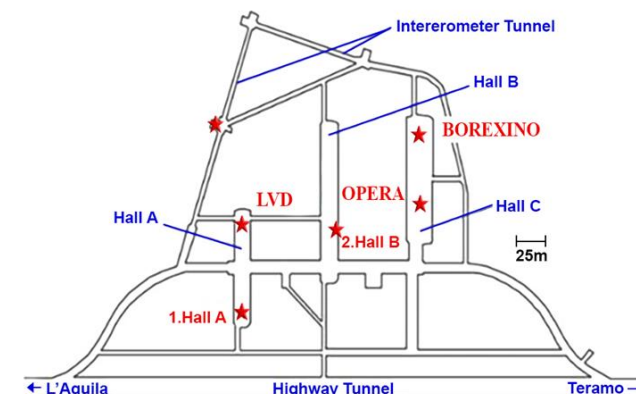
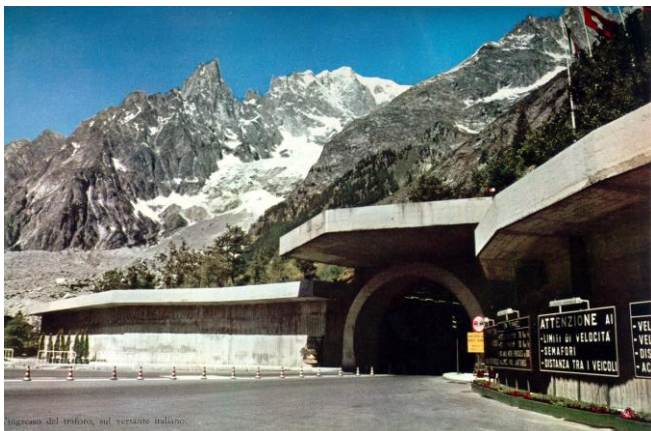


Счётчик из нержавеющей стали толщиной 4 мм размером $100 \times 100 \times 150 \text{ см}^3$ заполнен сцинтиллятором на основе уайт-спирита.

Large Volume Detector (LVD) с 1992 г. по настоящее время

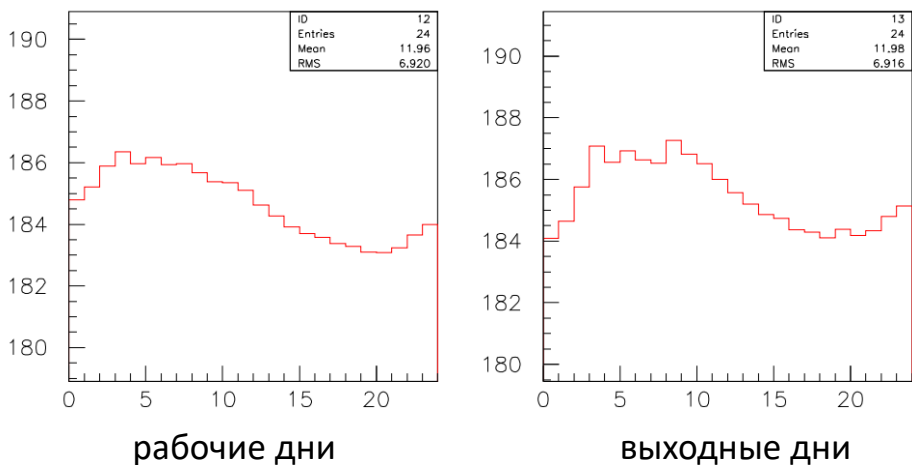


Расположен в Национальной Лаборатории Гран Сассо Института ядерной физики Италии (LNGS INFN).



Сравнение данных с LSD и LVD за 1997 год

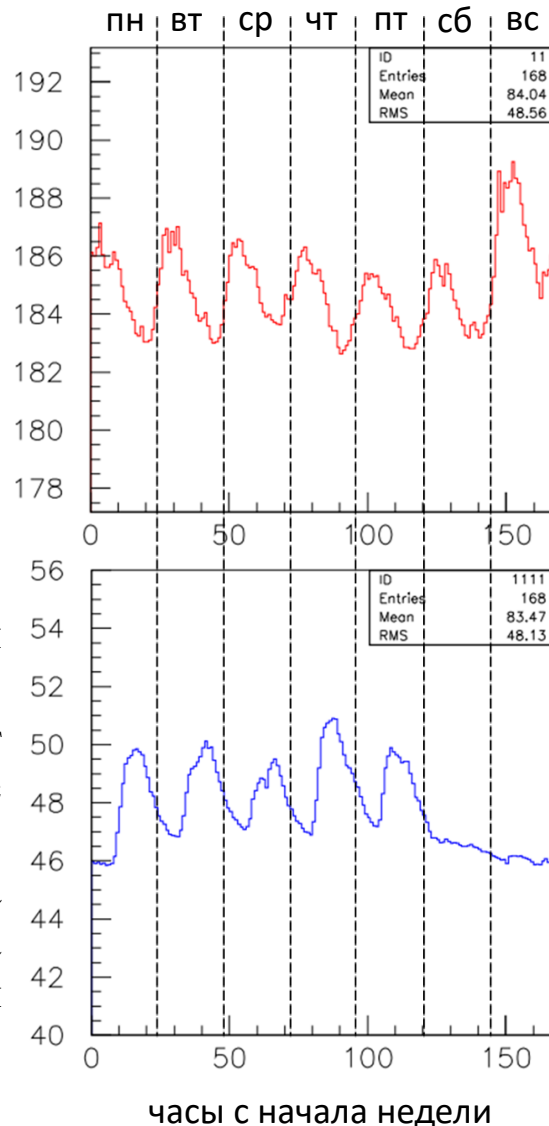
LSD



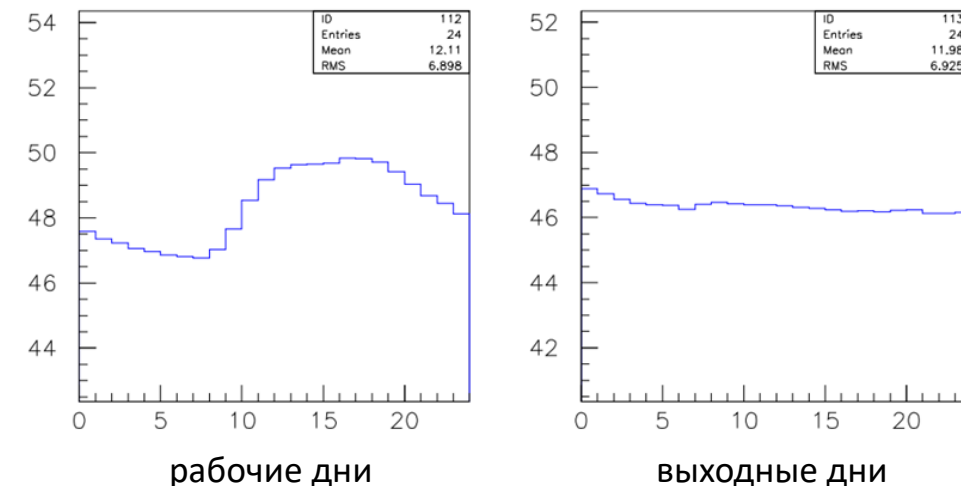
Воздух в помещение установки LSD подавался через фильтры мощным кондиционером напрямую из транспортного туннеля.

Вентиляция в помещении LSD зависела от вентилирования транспортного туннеля, рядом с которым находилась установка.

Мощность туннельной вентиляции не постоянна и зависит от интенсивности движения транспорта по туннелю (мало машин — минимум вентиляции).



LVD



В зале эксперимента LVD работает принудительная вентиляция в непрерывном режиме, подающая чистый воздух с поверхности. Благодаря хорошей изоляции помещения и действию приточной вентиляции, при закрытых воротах концентрация радона в зале достаточно низкая и составляет $\sim 26 \text{ Bq/m}^3$. В прилегающих коридорах она больше в несколько раз. Днем в рабочее время открываются ворота, что приводит к увеличению концентрации радона в зале LVD, т.к. начинает поступать воздух из соседних помещений с повышенной концентрацией радона.

Выводы к главе 2

1. Мониторинг концентрации радона в атмосфере подземного зала возможен благодаря регистрации в LVD гамма-квантов дочерних продуктов распада. Резкое увеличение скорости счета гамма-квантов связано с инъекцией радона в атмосферу зала. Наблюдается задержка (~ 1 час) данных LVD относительно данных радиометра радона.
2. **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 $6.2 \pm 0.5\%$.**
3. Радоновые выбросы имеют форму пика, которая 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. По окончании пика величина концентрации выходит на равновесное значение.
4. 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 по настоящее время.
5. **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.** Сравнительный анализ данных установок LVD и LSD подтверждает, что суточные и недельные вариации концентрации радона в подземных помещениях имеют техногенное происхождение и в значительной мере обусловлены устройством системы вентиляции.

Измерения температуры, влажности и давления в экспериментальном зале

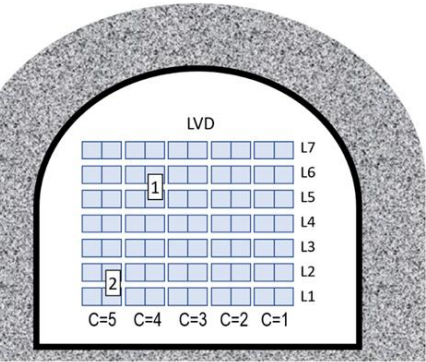
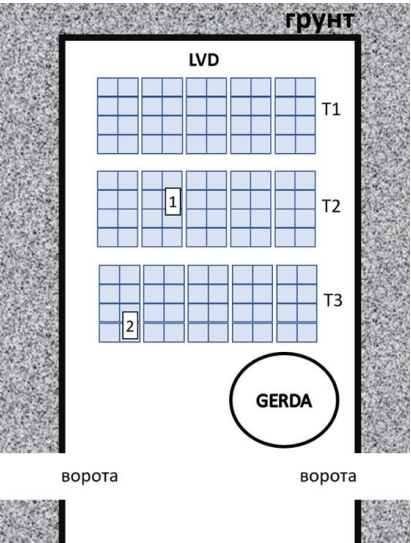
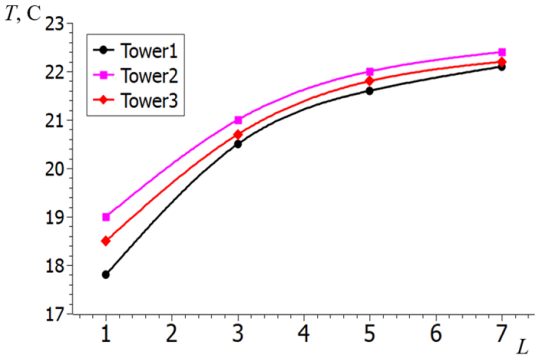
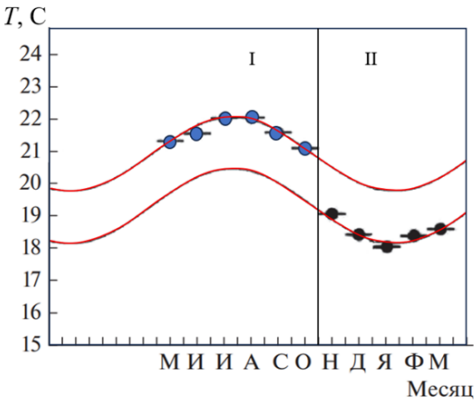
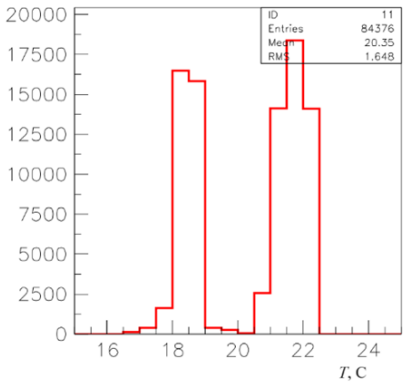
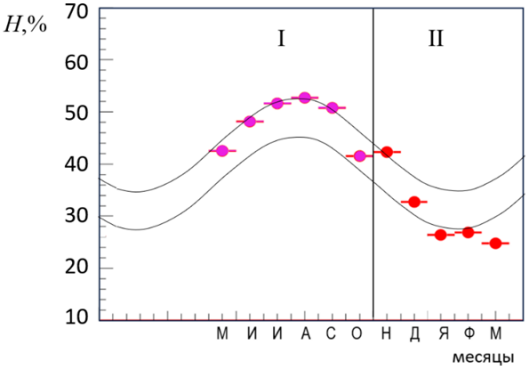
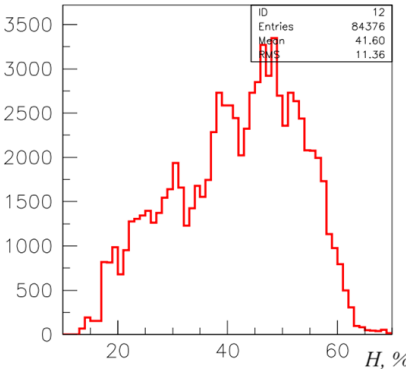


Схема расположения термогигрометра в структуре LVD

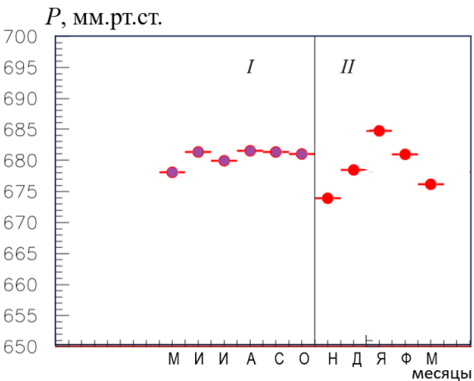
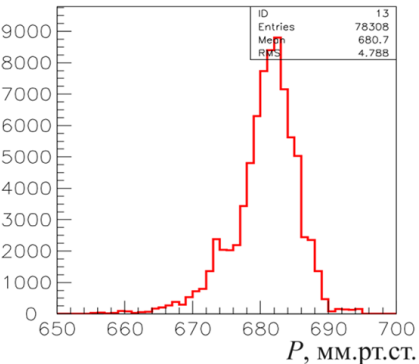
ТЕМПЕРАТУРА



ВЛАЖНОСТЬ



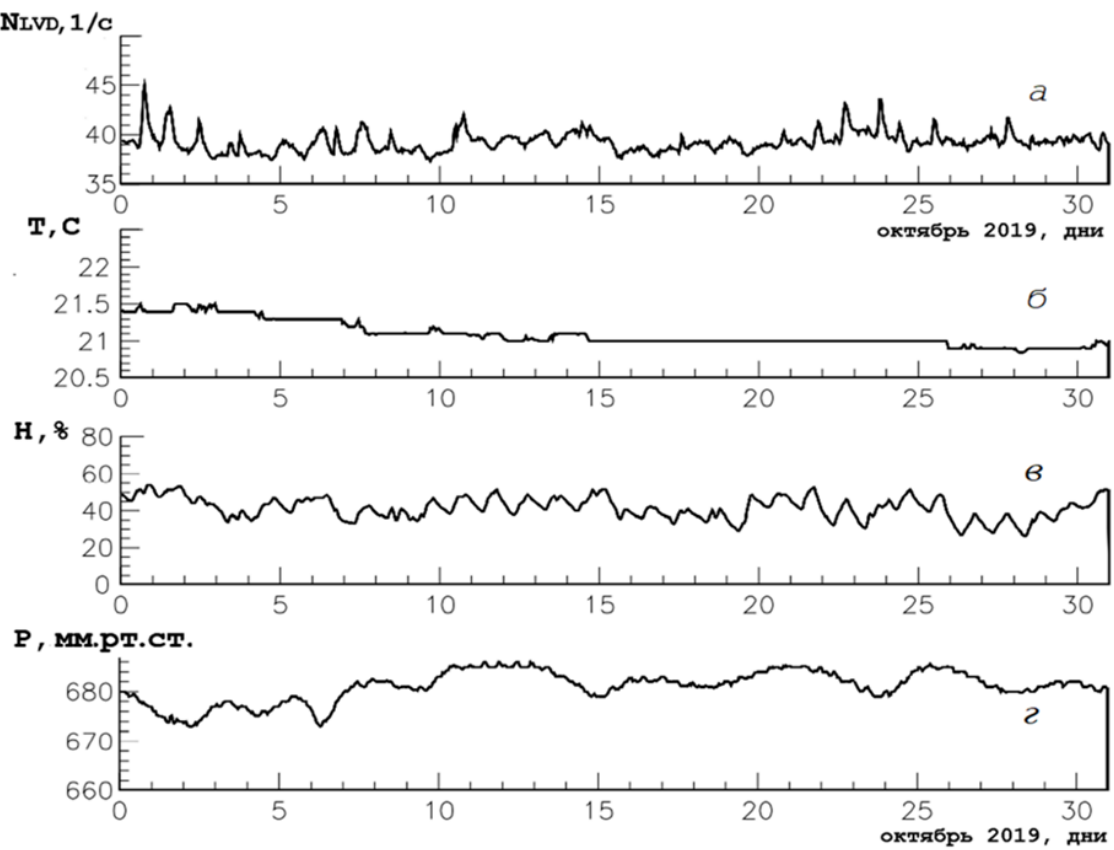
ДАВЛЕНИЕ



В 2019-2020 годах в подземном зале эксперимента LVD было проведено несколько серий измерений для изучения климатических условий в подземном зале установки с помощью термогигрометра ИВТМ-7 М 6-Д .

	Среднее значение в серии I	Среднее значение в серии II	Сезонная вариация
T, C	18.5±0.1	21.5±0.1	6 %
H, %	35.0 ± 0.1	44.0 ± 0.1	17 %
P, мм рт.ст.	682 ± 1	679 ± 1	-

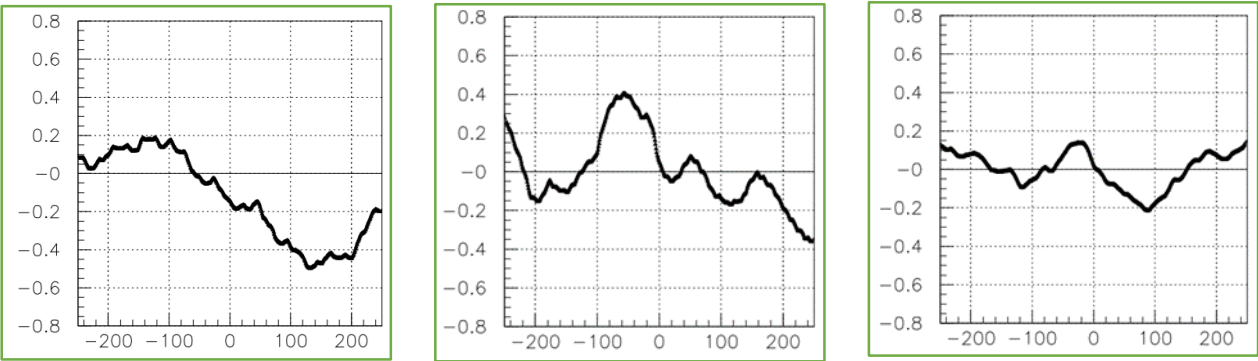
Сравнение данных LVD и термогигрометра



Пример временных рядов за октябрь 2019 г.: *а* - скорости счета гамма-квантов на LVD (на счетчик в секунду), *б* - температуры, *в* - влажности, *г* - давления.

Выбранные периоды для корреляционного анализа

Период <i>A</i> - 55 суток	Период <i>B</i> - 45 суток	Период <i>C</i> - 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



Использовалась корреляционная функция:

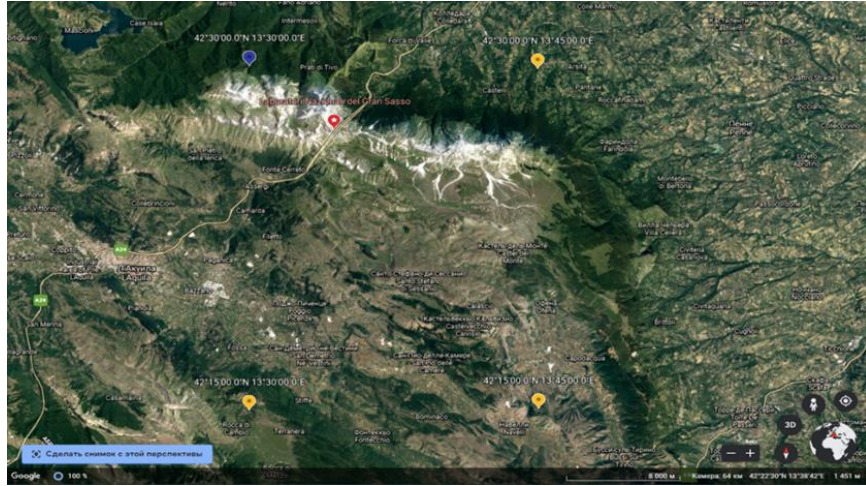
$$K(T) = \frac{\sum_j (C_{LVD}(t) - \overline{C_{LVD}})(P(t + T) - \overline{P})}{(N - 1)\sigma_{LVD}\sigma_P},$$

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

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

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

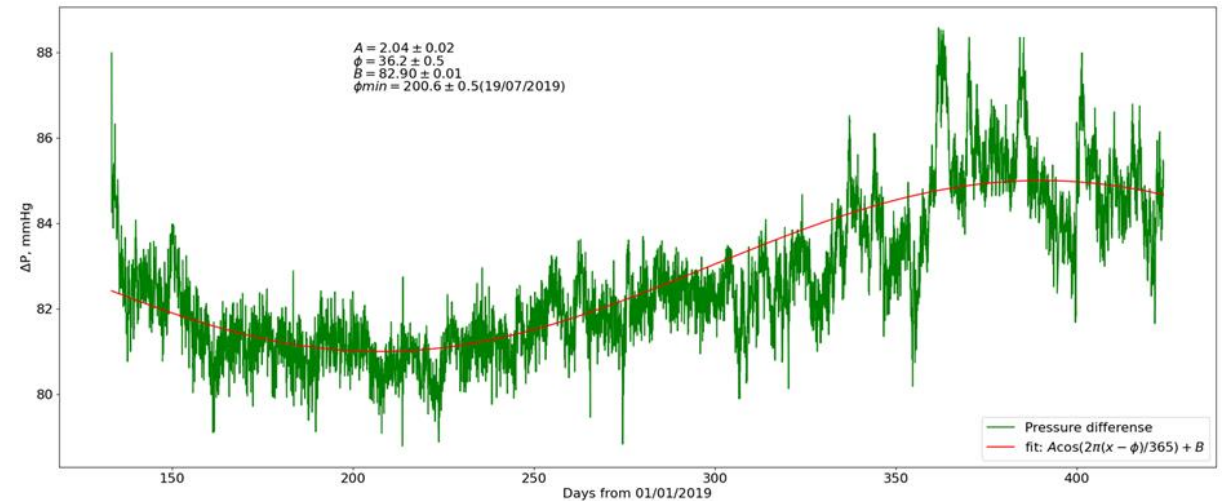
Связь давления в подземном зале с атмосферным давлением



ERA5 - это реанализ пятого поколения от Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) глобального климата и погоды. 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.

Синяя метка – ближайшая к лаборатории точка ячейки (10.3 км от входа). В базе данных атмосферное давление на поверхности приводится в пересчете к уровню моря.



Временные ряды атмосферного давления (синяя линия) и давления в зале установки LVD (красная линия) повторяют друг друга и имеют очень сильную корреляцию. Разница давлений практически постоянна $\langle P_{atm} - P_{hall} \rangle = 82.1 \pm 1.6$ мм рт. ст. и имеет небольшую сезонную вариацию ($\sim 2\%$), минимум которой приходится на конец июля, максимум – на начало февраля.

Барометрический эффект на LVD

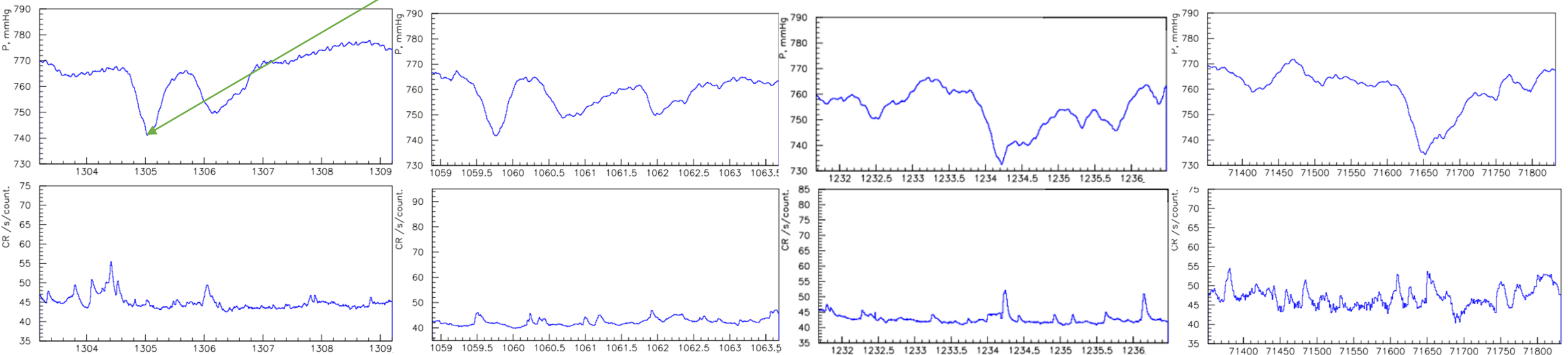
При резких колебаниях атмосферного давления происходит откачка подземных газов в атмосферу, и, наоборот, может происходить закачка воздуха в грунт.



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

В работах [Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Громушкин Д.М. и др. // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. № 5. С. 845] и [Стенькин Ю. В., В. В. Алексеенко В.В., А. В. Игошин А. В. И др. // ЖЭТФ. 2020. Т. 158. С. 469] впервые был обнаружен задержанный барометрический эффект для нейтронов и гамма-квантов, рождающихся в результате радиоактивного распада радона.

В работе [L. B. Bezrukov, I. S. Karpikov, V. V. Kazalov 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. Vol. 64, No. 1. P. 102–111] методом корреляционного анализа обнаружен задержанный пампинг-эффект для пар переменных “давление-радон” и “давление-ионы” в закрытом помещении на глубине 10 метров.



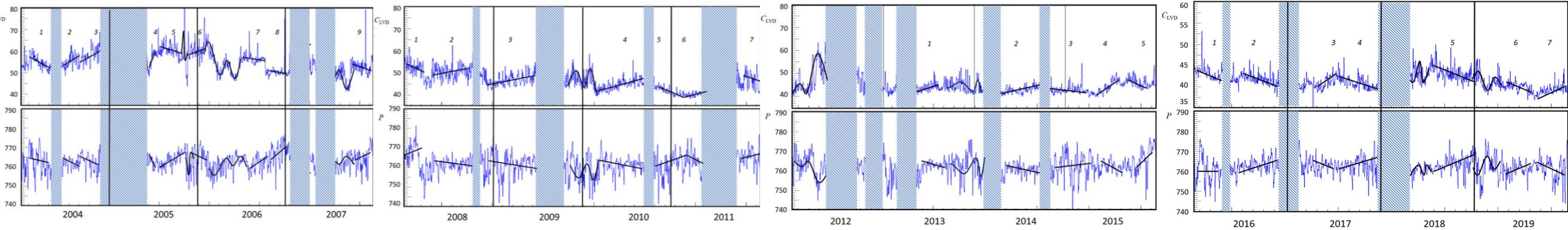
Примеры временных ряды скорости счета гамма-квантов во время резких понижений давления (падение давления >20 мм рт. ст. менее чем за 72 часа).

Тренды временных рядов скорости счета гамма-квантов и атмосферного давления

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

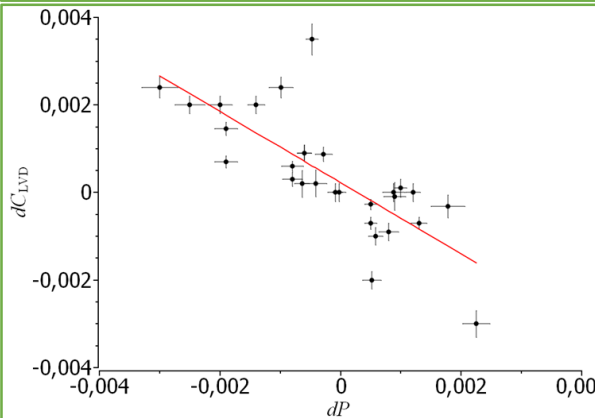


Временные ряды атмосферного давления (синяя линия; значения слева) и скорости счета LVD по нижнему порогу (красная, зеленая, фиолетовая линии – для счетчиков башни 1, башни 2 и башни 3 соответственно; значения справа) за 12 лет наблюдений.



Временные ряды скорости счета гамма-квантов и атмосферного давления за период с 2004 по 2019 г. г. Заштрихованные области – аномальные выбросы радона.

Зависимость наклонов трендов изменения $C_{LVD}(t)$ и $P(t)$. Прямая – приближение функций $f(x) = a + bx$, где $a = 2.2 \times 10^{-4}$, $b = -0.81 \pm 0.13$. Коэффициент корреляции Пирсона между значениями наклонов равен -0.79 .



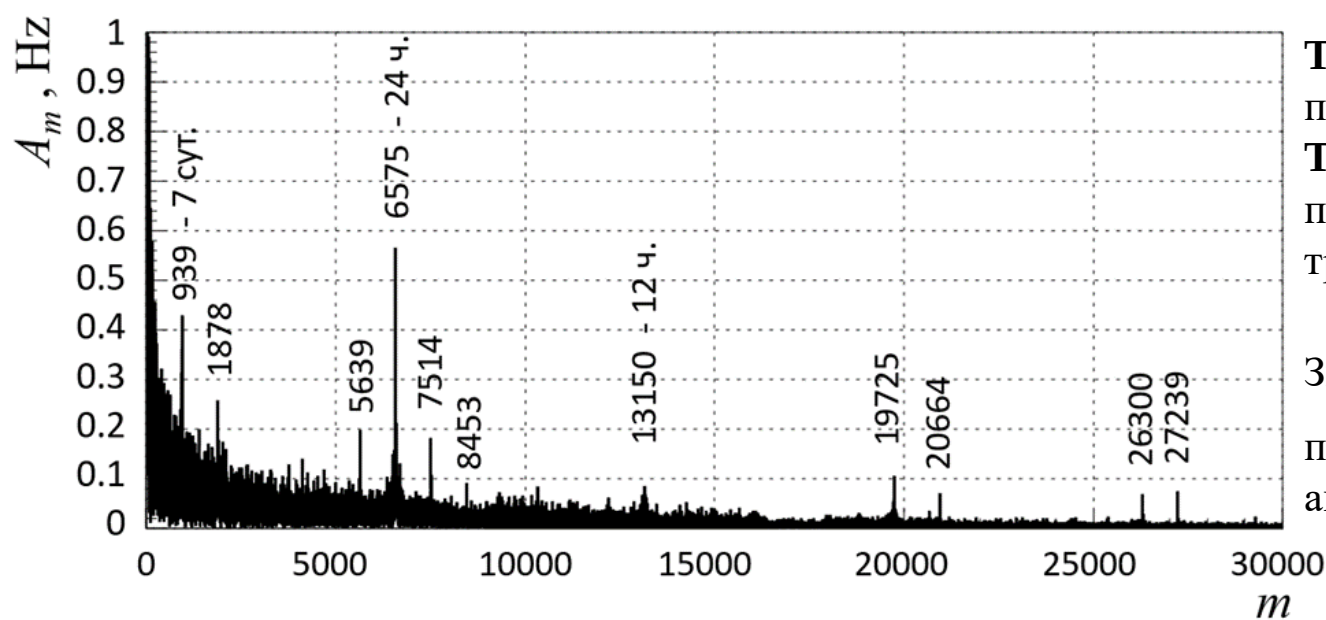
N	Дата начала тренда	Дата конца тренда	Число суток	Наклон dC_{LVD}	Наклон dP
1	31.01.2004	23.04.2004	83.3	-0.0030	0.0024
2	23.04.2004	15.07.2004	83.3	-0.0010	0.0024
3	26.08.2004	17.11.2004	83.3	0.0023	-0.0030
4	14.06.2005	25.07.2005	41.7	0.0080	-0.0035
5	25.07.2005	06.11.2005	104.2	-0.0019	0.0015
6	27.11.2005	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

Выводы к Главе 3

1. 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 $\langle T \rangle = (20.0 \pm 0.1 \text{ сис})$ °C. Температура воздуха зависит от высоты, на которой проводились измерения и слабо от сезона (зима-лето). Относительная влажность в центре детектора $\langle H \rangle = (39.5 \pm 0.2 \text{ сис})$ %. Сезонная вариация среднемесячной влажности составляет $\sim 17\%$. В зале детектора среднемесячное давление практически постоянно и равно $\langle P \rangle = (680 \pm 1 \text{ сис})$ мм рт. ст.
2. 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.
3. **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 (в вентилируемом помещении на высоте ~ 1000 м над уровнем моря при давлении 680 мм рт. ст.).**
4. Была обнаружена несезонная сильная антикорреляция трендов изменения скорости счета гамма-квантов и атмосферного давления на масштабах порядка 3–4 мес.

Фурье анализ временных рядов скорости счета гамма-квантов на LVD

Для поиска периодических сигналов в скорости счета был применен дискретный Фурье-анализ. Было использовано 157800 значений темпа счета LVD с 2004 по 2021 г (18 лет), период самой медленной гармонике номер $m=1$: $T_1=157800$ часов = 18 лет (частота $f_1=1/T_1$). Период самой быстрой гармонике номер 78900: $T_{78900}=2$ часа.



$T=1$ сутки ($m = 6575$, $A_m = 0.56$ Гц, $\eta = 10$) – солнечно-суточные приливы в грунте

$T=7$ суток ($m = 939$, $A_m = 0.43$ Гц, $\eta = 10$) – работа персонала в подземной лаборатории и автомобильный трафик в транспортных туннелях

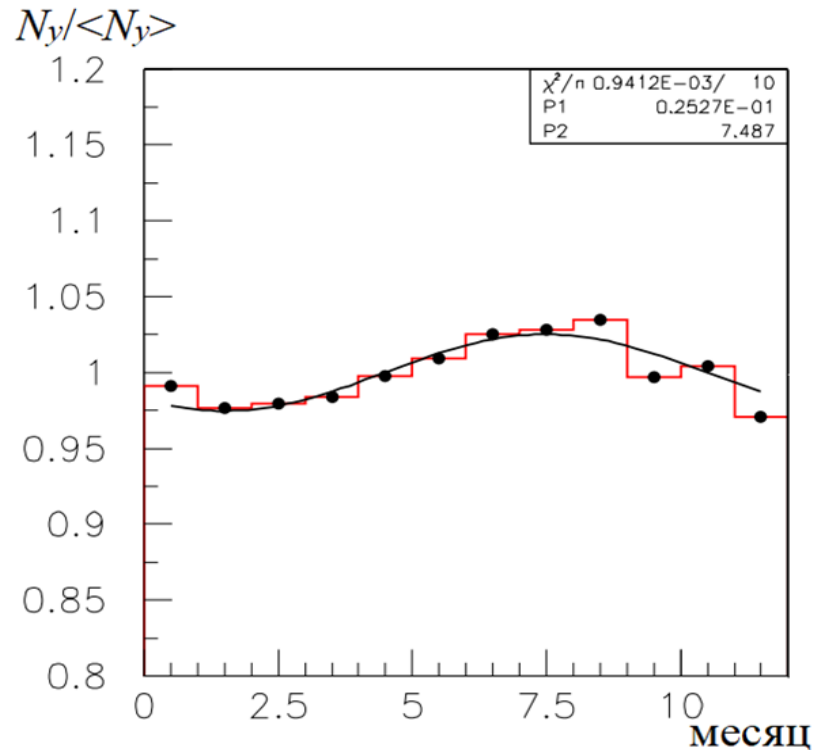
Значимость гармоник $\eta_m = \frac{A_m - B_m}{s(A_m - B_m)} = \frac{A_m - B_m}{\sqrt{(s(A_m))^2 + (s(B_m))^2}}$.
показывает на сколько среднеквадратичных отклонений амплитуда гармоники превышает амплитуду белого шума.

- Пик от годовых вариаций **365 – 366 суток** находится в районе гармоник $m \sim 18$:
для годового периода между перигелиями **$T = 365.24$ суток** – средняя амплитуда **$A_m = 1.168$ Гц, $\eta = 2.6$**
- Пики от лунно-месячных вариаций (**27.2 – 29.8**) суток находятся в диапазоне гармоник **$m = 220 – 245$** :
для синодического периода **$T = (29.3 – 29.8)$ суток** – средняя амплитуда **$A_m = 0.457$ Гц, $\eta = 2.7$**
для аномалистического **$T = 27.55$ суток** – средняя амплитуда **$A_m = 0.223$ Гц, $\eta = 1.38$**

Для синодического периода ($T=29.5$ суток) была определена фаза (ϕ_m – максимум амплитуды гармоник) по одной самой большой по амплитуде гармонике. Было найдено, что через $\Delta t = (3.51 \pm 0.24)$ суток после полнолуния LVD «видит» увеличение выхода радона по измеряемым детектором гамма-квантам.

Сезонные вариации скорости счета гамма-квантов на LVD

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. Соответствующие данные за 12 лет наблюдений накладывались друг на друга и усреднялись.



Сезонные вариации скорости счета гамма-квантов LVD, в относительных величинах $N_y / \langle N_y \rangle$, полученные методом наложения эпох.

Эти результаты хорошо обеспечены статистически: измерения проводятся каждые 10 минут, а затем усредняются по большому объему данных. Каждый бин гистограммы содержит порядка **10^9 отсчетов**, что дает относительную ошибку порядка **0,003%**.

$$N_y(t) = 1 + \delta N_y / \langle N_y \rangle \times \cos(2\pi(t - \varphi_y) / T)$$

Величина сезонной вариации $\delta N_y / \langle N_y \rangle = (3.0 \pm 1.1)\%$.

Фаза $\varphi_y = (7.5 \pm 0.5)$ месяцев.

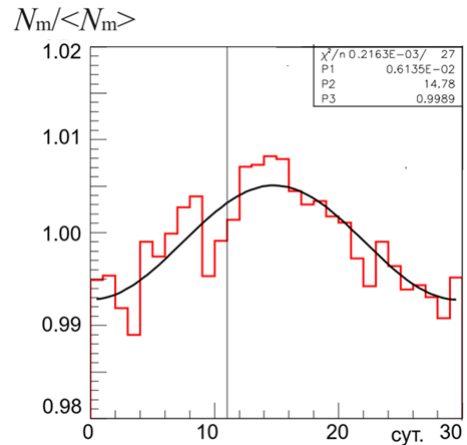
Ошибка определения величины $\delta N_y / \langle N_y \rangle$ связана с колебанием климатических условий год от года, количеством осадков, атмосферными и сейсмическими явлениями в регионе.

Максимум выхода радона приходится на август-сентябрь. Радон переносится подземными водами, и его максимальная концентрация достигается во время максимального насыщения скалы водой.

Лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов на LVD

Поиск вариаций, связанных с гравитационными эффектами от вращения Земли и Луны проводился для периода 29.5 суток.

Метод наложения эпох I



Эпоха составляет 708 часов (708/24 = 29.5 суток).

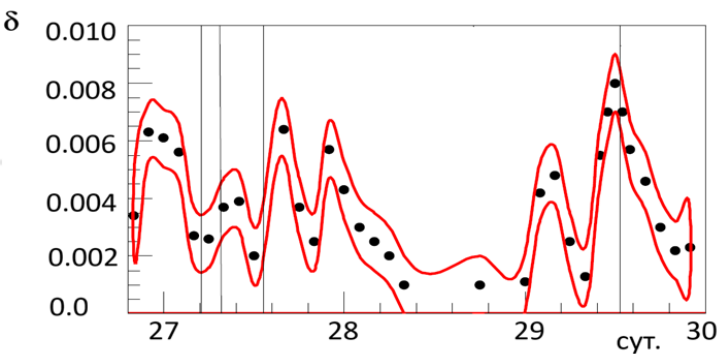
Лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов $\delta N_m / \langle N_m \rangle$. Данные за период 01.01.2009—31.12.2021 нормированы на среднее за год.

Полнолуние приходится на 11 сутки с начала 2009 г.

Аппроксимация гармонической функцией:

амплитуда модуляции $\delta N_m / \langle N_m \rangle = (0.6 \pm 0.2)\%$

фаза $\varphi_m = 15 \pm 3$ (максимум кривой) $\rightarrow$ сдвиг от полнолуния ~ 4 сут.



Кривыми показаны диапазоны ошибок определения амплитуды модуляции.

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

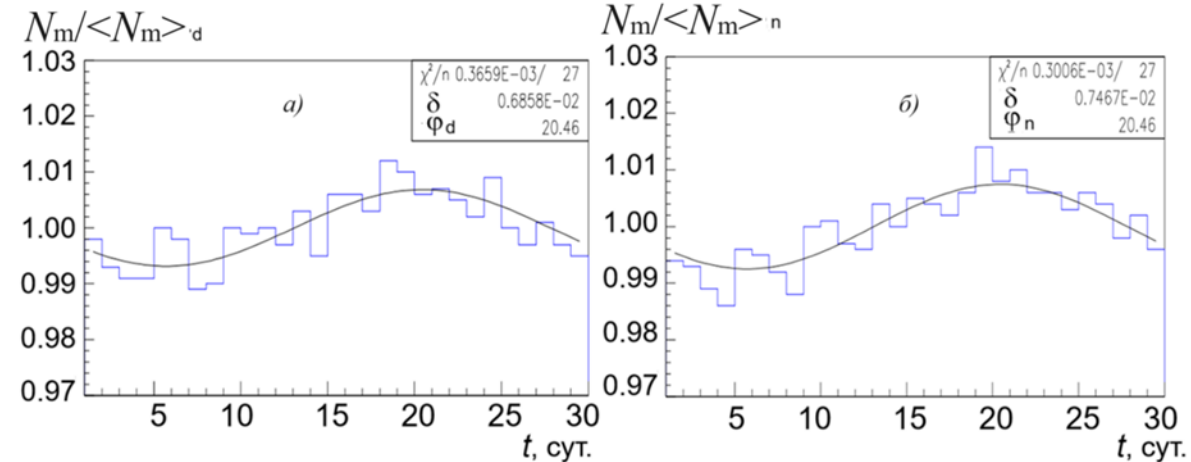
Зависимость относительной амплитуды модуляции от выбранной эпохи (статистика 01.01.2004—31.12.2021).

Метод наложения эпох II

Формировались временные ряды по 29 суток с полнолунием, приходящимся на 15-ые сутки лунного месяца.

Статистика 2009 – 2019 годов была разделена на два периода:

а) дневные часы с 08 утра по 20 часов и б) ночные часы с 23 часов по 06 утра.



Аппроксимация гармонической функцией с периодом $T=29.5$ сут. дала **амплитуду модуляции $\delta_d = \delta_n = 0.7\%$ и фазой $\varphi_m = 20 \pm 3$, сдвинутой относительно полнолуния на ~ 5 суток, для дневных и ночных периодов одинаково.**

Выводы к Главе 4

1. Метод Фурье-анализа позволил найти суточный период ($T = 24$ часа) и недельный период ($T=7$ суток) во временных рядах скорости счета гамма-квантов на LVD. Эти периоды определены с большой значимостью $\eta = 10\sigma$.
2. **Найдены годовые (сезонные) вариации скорости счета гамма-квантов на LVD. За период с 2004 по 2021 года 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 меняется год от года и связана с колебаниями количества выпавших осадков и скоростью таяния снега в горах в летний период.**
3. **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.**
4. Земная кора, как и литосфера в целом, под воздействием приливных волн в Земле постоянно подвергается деформациям. В результате таких деформаций в породах, из которых складывается земная кора, возникают внутренние напряжения, воздействующие на их физические свойства, а также изменяется объем микропор, микротрещин и капилляров. Результаты проведенного анализа подтверждают, что в районах геофизических разломов возрастает эманация глубинных газов, коррелирующая с приливами в земной коре.

Заключение. Пункты защиты.

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 г. г.
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 года 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.).

Публикации 1 - 8

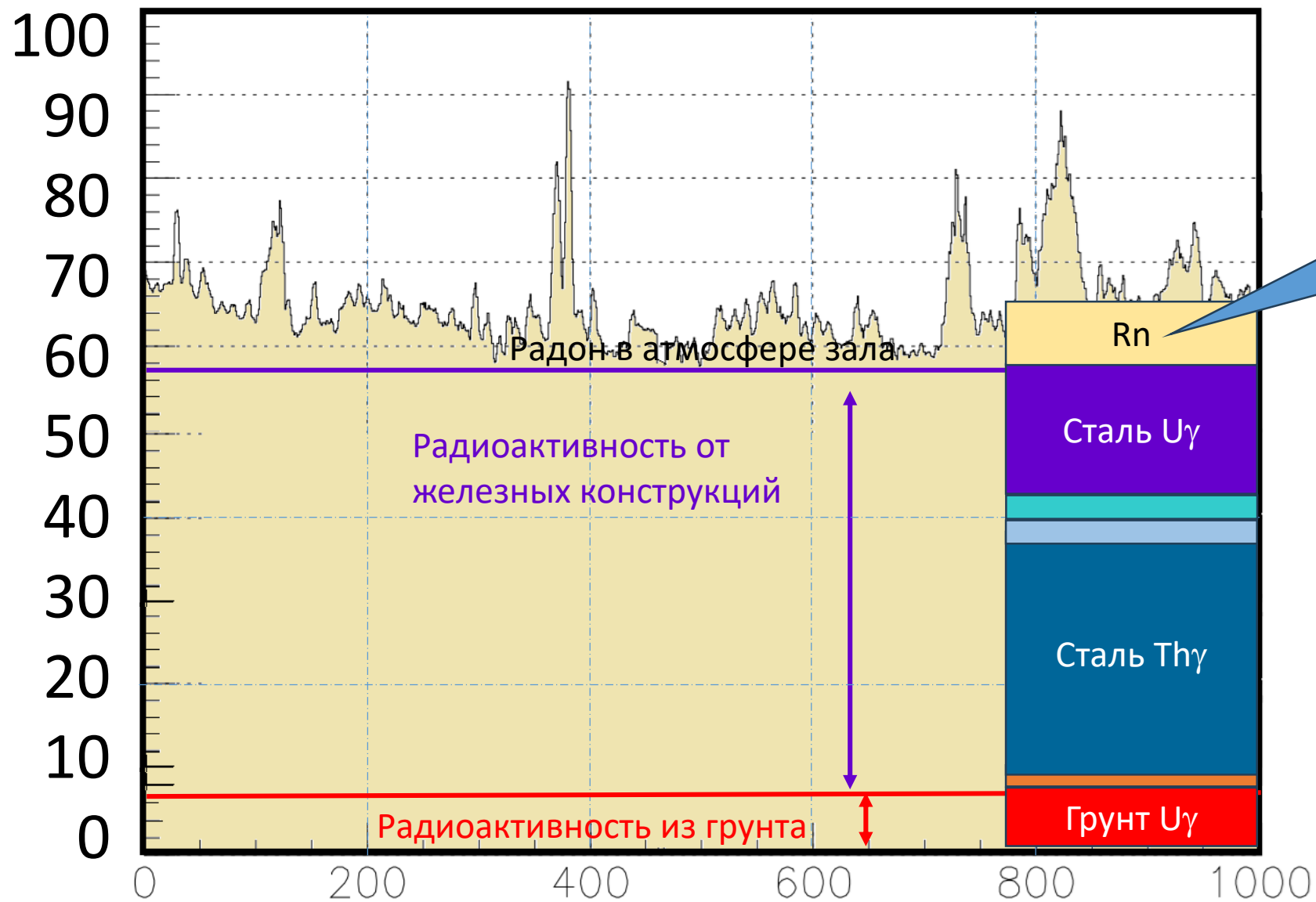
Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 13 из которых изданы в научных журналах, рекомендованных ВАК, индексируемых Web of Science и/или Scopus:

1. Н. Ю. Агафонова, В. А. Алексеев, Е.А. Добрынина, В. В. Кузнецов, А. С. Мальгин, О. Г. Ряжская, В. Ф. Якушев, Препринт № 1071/2001 ИЯИ РАН (2001) **(п. 1, 2, 3, 4)**
2. Н. Ю. Агафонова, 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 **(п. 5, 6)**
3. 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, №1, 85-94 **(п. 3, 4)**
4. 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 Серия физическая, 2019, том 83, № 5, с. 673–675, DOI: 10.1134/S0367676519050041 **(п. 3, 4, 7)**
5. N. Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina, R.I. Enikeev, N.A. Filimonova, O.G. Ryazhskaya, 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, Vol. 84, No. 6, pp. 1065–1069 (only eng.) DOI: 10.1134/S1063778821130019 **(п. 1, 2)**
6. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, О. Г. Ряжская, Н.А. Филимонова, И.Р. Шакирьянова, В.Ф. Якушев и коллаборация LVD "Отклик детектора LVD на землетрясения в центральной Италии", Известия РАН. Серия физическая, Т.85, N11, 1661-1665 (2021) DOI: 10.31857/S036767652111003X **(п. 1, 2, 7)**
7. 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. Molinario, R. Persiani, I. A. Pless, O. G. Ryazhskaya, 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, Vol. 134, No. 4, pp. 449–458. DOI: 10.1134/S1063776122040124 **(п. 1, 2, 3)**
8. 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. 78(1), 2310202 (2023) **(п. 3, 4, 7)**

9. 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 (п. 7)
10. 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, Vol. 87, No. 7, pp. 1053–1055. DOI: 10.3103/S1062873823702404 (п. 1, 2)
11. 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, том 164, вып. 3 (9), стр. 386–395 (п. 3, 4, 5, 6)
12. 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, Vol. 86, No. 6, pp. 1014–1020 (п. 1, 2, 5, 6)
13. В.Ф. Якушев, Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, Е.А. Добрынина, Р.И. Еникеев, Н.А. Филимонова, И.Р. Шакирьянова (и коллаборация LVD), "Частотно-временной анализ измерений радоновых выбросов в подземной лаборатории LNGS, измеренных детектором LVD", ЖЭТФ, 2024, том 166, вып. 3 (9), стр. 330–339. DOI: 10.31857/S0044451024090049 (п. 5, 6)
14. 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)", стр. 108-113, 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) (п. 7)
15. N. Yu. Agafonova, V.V.Ashimikhin, E.A.Dobrynina, S.V.Ingerman, O. Yu. Slutskaya, I.R.Shakiryanova, and V.F.Yakushev (on behalf of the LVD Collaboration) "Experiment Analysis of Correlations between the Counting Rate for Natural-Radioactivity Gammas at the Large Volume Detector (LVD) and Atmospheric Pressure", Physics of Atomic Nuclei, 2024, Vol. 87, No. 6, pp. 732–739 (п. 7)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

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



50
Бк/м³

Расчет вклада с
учетом
эффективности
регистрации

