

1. Установка 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 LVD проводятся подземные исследования по нейтринной астрофизике и физике космических лучей. Основная задача – поиск нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звездных ядер [1,2].

Установка на сегодня является самым крупным сцинтилляционным детектором и содержит 1260 м³ жидкостного сцинтиллятора (1000 тонн), заполняющего 840 счётчиков объемом 1,5 м³ каждый. Счётчик имеет форму, близкую к кубической (100×100×150 см³), сделан из нержавеющей стали толщиной 4 мм (Рис.1). На верхней грани установлены три фотоумножителя с диаметром фотокатода $\varnothing = 15$ см (ФЭУ-49Б или ФЭУ-125), включённые на совпадение. Счётчики помещены по 8 штук в металлические модули-контейнеры (толщина стенок 20 мм), из которых набираются вертикальные колонны (7 модулей). Пять таких колонн объединяются в башню, таким образом, одна башня содержит 35 модулей с 280 счётчиками (Рис.2а,б).

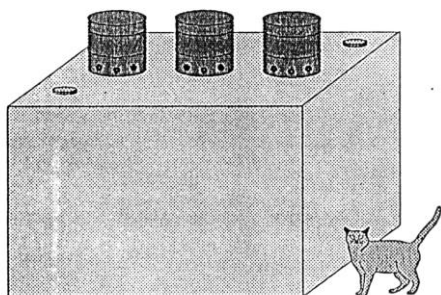
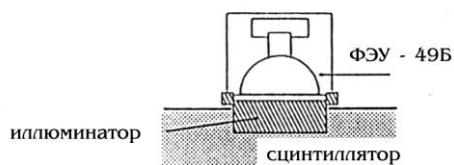
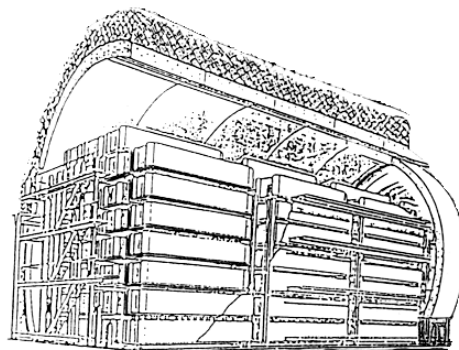
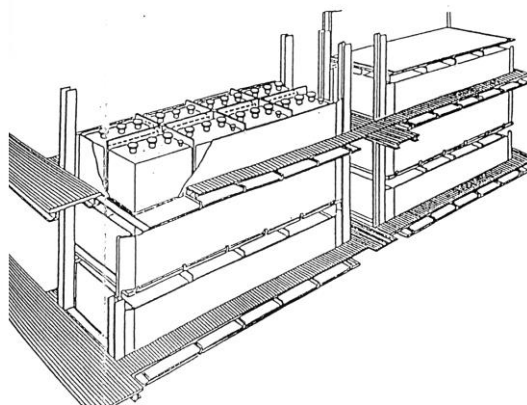


Рис.1 Сцинтилляционный счетчик установки LVD.

LVD находится в подземном зале Национальной лаборатории Гран Сассо INFN в горном массиве Гран Сассо в Центральной Италии



а) Общий вид установки.



б) Вид нескольких модулей.

Рис.2 Детектор большого объема (LVD).

Под толщей скальной породы около одного километра и примерно на такой же высоте над уровнем моря. Экспериментальные подземные залы лаборатории располагаются поблизости, в 50÷100 метрах, от двух параллельных транспортных туннелей (около 10 км каждый) для проезда из центральной части Италии к Адриатическому побережью (Рис.3).

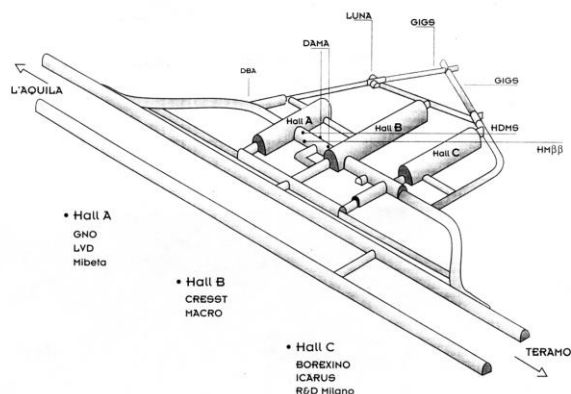


Рис.3. План подземных помещений лаборатории.

Зал эксперимента LVD имеет объём 24000 м³, из них около 2000 м³ 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, так что в зале создается небольшое избыточное давление. Забор воздуха идёт “из долины”; предполагается, что содержание радона в нем незначительно. Вентиляция, по требованиям техники безопасности, работает постоянно, она выключается регулярно один раз в неделю на 5÷10 минут для смены нагнетающих насосов или, в редких случаях, по технической необходимости. При выключенной вентиляции примерно через час начинается заметное нарастание концентрации радона. Температуру в зале можно считать постоянной на уровне +17°C. Все эти детали важны с точки зрения изучения вариаций концентрации радона в данном подземном помещении.

2. Метод регистрации.

Радон $^{222}_{86}\text{Rn}$ образуется в грунте в результате деления и распадов элементов уранового и ториевого рядов и выходит в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в породе или из воды, насыщающейся радоном (радон хорошо растворяется в воде) на пути через скальную породу до подземного зала. Поскольку количество микротрещин увеличивается при деформациях земной коры перед землетрясениями, то должна усиливаться и эманация радона.

На возможности установки LVD для изучения вариаций концентрации радона C_{Rn} под землей было обращено внимание после обнаружения аномального повышения фонового темпа счета детектора (Рис.4) в дни наиболее сильных сейсмических толчков (сентябрь 1997 года). Эпицентр толчков находился в Центральной Италии, примерно в 300 км от установки. После похожего увеличения темпа счета в 1999 году, которое по времени появления было ассоциировано с разрушительным землетрясением в Турции, мы начали целевое изучение вариаций темпа счёта низкоэнергетичных фоновых событий, как отражающих временное поведение C_{Rn} . С ним связываются надежды выделить предвестники сильных землетрясений.

Следует отметить, что на данном этапе нами не ставилась задача прогнозирования землетрясений. Прогноз предполагает предсказание, с известной достоверностью, трёх характеристик: силы, времени и места очага

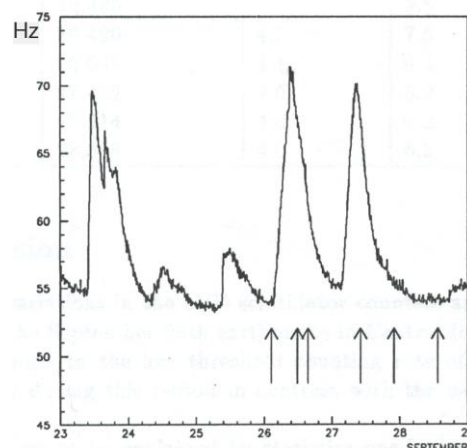
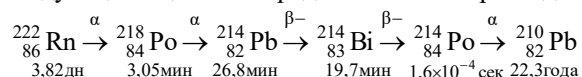


Рис.4 Темп счета установки во время землетрясения в Италии (1997 г.).
Стрелками отмечены моменты сейсмических толчков.

землетрясения, что можно считать сверхзадачей наших исследований. Мы же пока хотим выявить источники фоновых радоновых событий и *a posteriori* выделить характеристики вариаций концентрации радона под землей, коррелирующие со временем сильных землетрясений, без чего нельзя решить общую задачу прогноза (если он вообще возможен по радону!).

Установка LVD регистрирует γ -кванты от распадов дочерних ядер радона $^{222}_{86}\text{Rn}$, период полураспада которого 3,8 дня. Наиболее вероятна следующая цепочка радиоактивных распадов:



Гамма-излучение создаётся, в основном, ядрами $^{214}_{83}\text{Bi}$, за счёт β -распада превращающимися в $^{214}_{84}\text{Po}$ с характерным временем $\tau = 19,7$ мин. Энергетический спектр γ -излучения охватывает диапазон от 0,6 до 2,5 МэВ и имеет состав, представленный в Таблице 1.

Табл. 1.

Спектр γ -квантов от $^{214}_{83}\text{Bi}$.

Энергия γ -квантов, МэВ	Количество γ -квантов на 100 ядер $^{214}_{83}\text{Bi}$
0,609	47
1,764	17
1,120	17
1,238	6
2,204	5
1,378	5
0,769	5
1,400	4
2,445	2

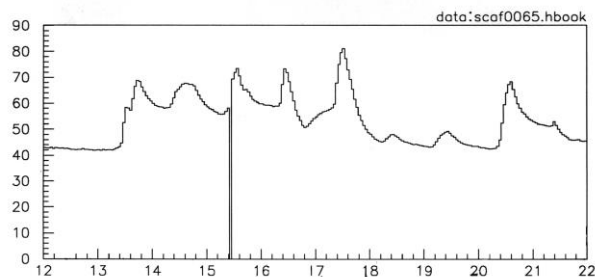
Система регистрации содержит низкоэнергетичный канал, порог срабатывания которого 0,5 МэВ (для внутренних, защищенных от радиоактивности породы, счетчиков). Данные, используемые для исследования фона низкоэнергетичных импульсов, формируются следующим образом: каждые 10 минут все сцинтилляционные счётчики башни запускаются импульсом от генератора на регистрацию низкоэнергетичных импульсов в течение 10 секунд. Ввиду невысоких энергий, γ -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. Так как порог регистрации энерговыделений во внутренних счетчиках – 0,5 МэВ, установка способна фиксировать практически все из “распадных радоновых” γ -квантов, падающих на счётчик сверху.

Для измерений величины C_{Rn} используются внутренние счётчики (80 счётчиков) одной башни, хорошо защищённые от радиоактивности скалы наружными счётчиками. При обработке данных из них отбираются наиболее стабильно работающие в течение длительного времени. Число включаемых в обработку счетчиков варьируется от 60 до 76. Суммарный темп счета нормируется на один счетчик в герцах (Hz). Полная эффективная регистрирующая поверхность 70-ти счетчиков составляет около 100 м², которой “просматривается” объём воздуха ~50 м³. Темп счёта измеряется автоматически. Количество отсчётов, обусловленных радоном, для 70 счётчиков составляет около 3150 за 10 секунд. Это задаёт чувствительность метода 5% на уровне 3 σ , т. е. за 10¹¹-секундный интервал измерений установка зафиксирует 5%-ое отклонение концентрации с достоверностью ~99,7%.

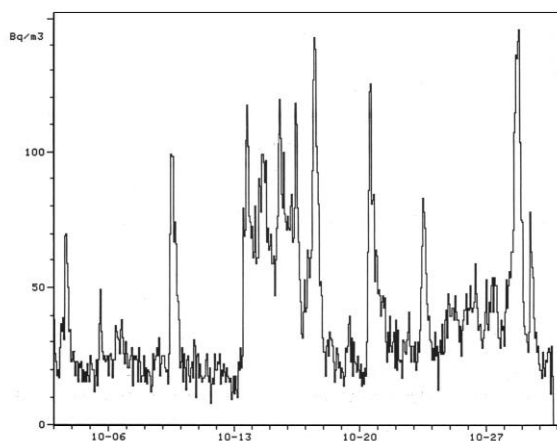
Эта величина более чем на порядок превышает чувствительность современных приборов, измеряющих величину C_{Rn} по α -активности ядер радоновой группы или по β -излучению короткоживущих продуктов распада (о детекторах травления нет смысла говорить, поскольку они не работают в режиме “on-line”).

Быстродействие метода (10 сек.) является уникальным, оно даёт возможность с высокой точностью фиксировать все детали временных изменений концентрации радона. Для сравнения на Рис.5 приведены данные радометра и установки LVD за перекрывающиеся временные интервалы.

Указанная особенность метода позволила выделить временные характеристики аномальных вариаций 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. Поэтому ниже вариации



a) Данные установки LVD за 12 – 22 октября 1997 года. Ось абсцисс – дата; ось ординат – темп счета установки в 1/сек-счетчик.



b) Данные радометра, помещенного внутрь установки LVD за 3 – 31 октября 1997 года. Ось абсцисс – дата; ось ординат – концентрация радона в помещении в Бк/м³.

Рис.5 Темп счета установки LVD и показания радометра.

такого вида будут называться “радоновыми пиками” (Рис.6). Как видим, полученные величины гораздо меньше времени жизни радона ($\tau_{Rn} = 5,5$ суток), следовательно, форма пика обусловлена инъекцией радона в атмосферу зала и его выдувом вентиляцией. Действительно, спад концентрации радона в зале неплохо согласуется с расчётным законом $C_{Rn}(t) = C_0 \exp(-t/\tau_{вент})$, где $\tau_{вент} = V_{зала}/F = 2,75$ часа, $V_{зала} = 22000$ м³, $F = 8000$ м³·час⁻¹ [3].

По окончании пика величина C_{Rn} выходит на постоянное, равновесное (между эманацией из скалы и воды, с одной стороны, и вентиляцией – с другой), значение ~20 Бк/м³. Идентификации аномальных возрастаний темпа счёта установки как “радоновых пиков” было посвящено несколько измерений, которые дали возможность однозначно ассоциировать пики именно с инъекцией радона. В одном из них через открытые ворота общей площадью 50 м² в экспериментальный зал

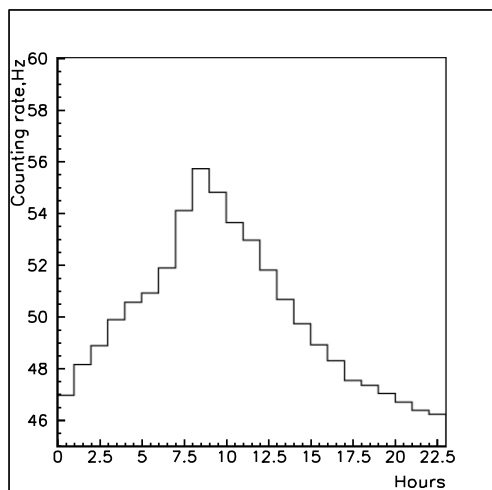


Рис.6 Усредненный радоновый пик (только для пиков с $A > 4$ Hz).

впускался воздух из соседних неветилируемых помещений с повышенной концентрацией радона. Ворота открывались на фиксированное время 0,5, 3,0 и 6,0 часов. Время нарастания величины C_{Rn} при этом составило: 3 часа - в первых двух случаях и 6 часов - в последнем (Рис.7). Отсюда можно заключить, что время перемешивания воздуха в зале около 3 часов.

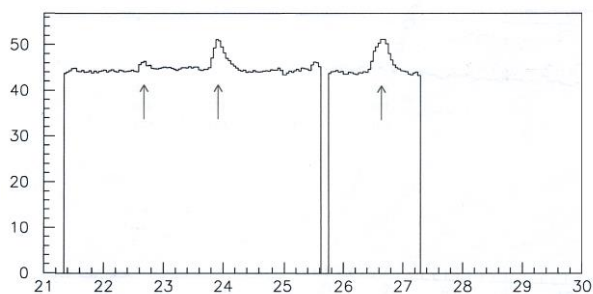


Рис.7 Радоновые пики при открытых воротах.

Это означает, что если нарастание пика превышает 3 часа, то длительность фронта пика соответствует времени инъекции радона в атмосферу зала. Рост концентрации радона при открытых воротах одновременно регистрировался α -частичным радометром, помещенным в структуру установки LVD. Это позволило разделить полный фоновый темп счёта установки LVD на две составляющие: переменную, “радоновую”, и постоянную, связанную с собственной радиоактивностью материалов установки и окружающей среды (в основном, скальной породы). Найдено, что в промежутках между пиками “радоновая” компонента составляет $\sim 10\%$ (~ 20 Вq/м³) от полного темпа счёта (~ 45 Hz/сч.). Можно отметить, что максимумам пиков соответствует

концентрация радона, в $5 \div 7$ раз превышающая равновесную.

Итак, установка LVD является совершенным прибором для изучения вариаций концентрации радона под землёй. Она обладает высочайшими чувствительностью и быстродействием, большой регистрирующей поверхностью, за счёт чего усредняются локальные изменения концентрации радона в разных точках зала, непрерывно работает в режиме “on-line”: рабочее время установки составляет $\sim 95\%$ от полного годового времени.

3. Результаты измерений.

На сегодня обработаны данные LVD за 1997 год. Систематический анализ радоновых пиков показал, что основной проблемой достоверного выделения радоновых предвестников землетрясения является выяснение роли фоновых радоновых пиков, доминирующих среди всех зарегистрированных пиков, число которых составляет ~ 450 за год. Следовательно, радоновые пики появляются чаще, чем раз в сутки. Амплитудное распределение пиков можно описать двумя экспонентами (Рис.8). Форма распределения меняется при $A \approx 4$ Hz, что соответствует концентрации радона на 20 Вq/м³ больше равновесной. Поэтому все пики по величине амплитуды можно разделить на две группы, каждой из которых соответствует свой показатель экспоненты.

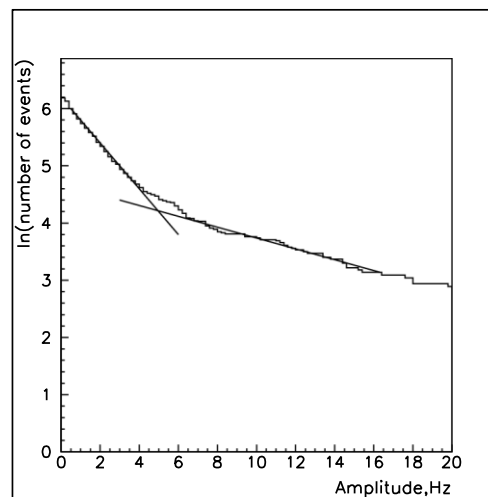
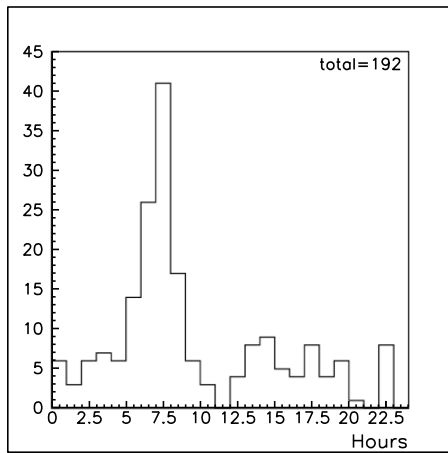
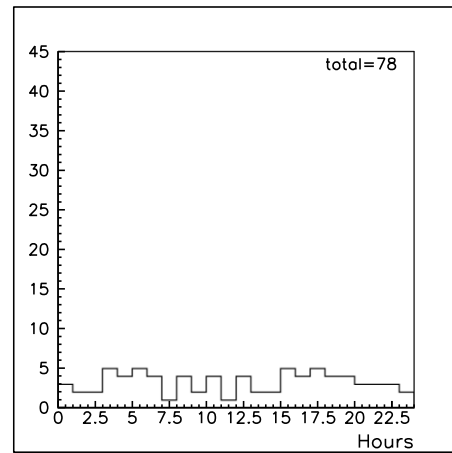


Рис.8 Интегральное распределение пиков по амплитуде.

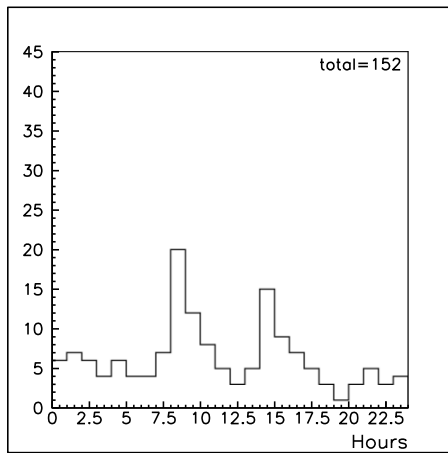
Группа пиков малой амплитуды ($A \leq 4$ Hz) включает $\sim 75\%$ всех пиков; вторая группа, соответственно, 25% . Анализ времени появления пиков (начало пика) дал неожиданный результат: в



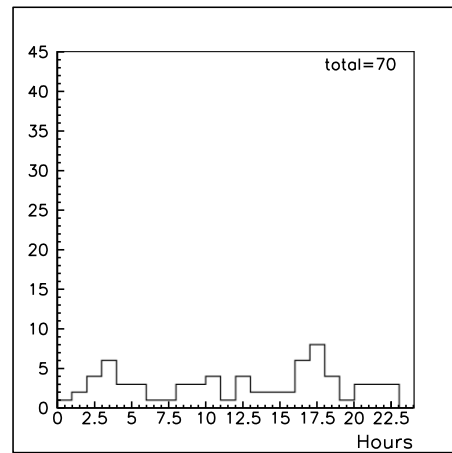
a) Рабочие дни, лето (апрель - октябрь).



c) Нерабочие дни.



b) Рабочие дни, зима(ноябрь - март).



d) Нерабочие дни.

Рис.9 Распределение радоновых пиков по времени суток (1997 г.).

обеих группах начало пиков чётко коррелирует с рабочим временем как в течение суток, так и недели. Распределение пиков в обеих группах по времени суток в рабочие дни имеет выраженный двугорбый вид с максимумами на 7÷8 и 13÷14 часах и провалом в 11÷12 часов (Рис.9а,b). Для суббот и воскресений двугорбая структура размывается и нет очевидных максимумов (Рис.9с,d). Помимо этого, имеется часовой сдвиг между распределениями “летних” и “зимних” радоновых пиков (Рис.9а,b), что, определённо, объясняется часовой разницей “летнего” и “зимнего” времени (часы установки всегда показывают “зимнее” время).

Распределения числа пиков по дням недели для малых и больших пиков различны: число малых пиков возрастает к концу недели (примерно в 1,5 раза), больших же резко уменьшается (примерно в 5 раз) в субботу и воскресенье (Рис.10). По-видимому, присутствие малых пиков в рабочие дни частично маскируется наличием

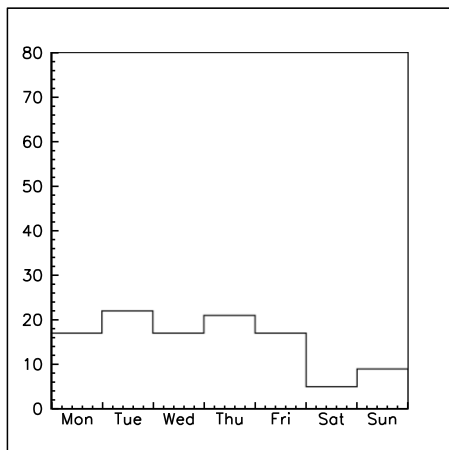
больших.

На основании этих фактов можно сделать следующие заключения:

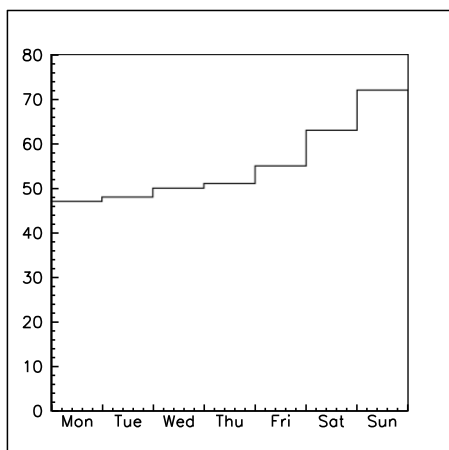
- в подавляющем большинстве радоновые пики являются техногенными, т.е. обязанными своим происхождением человеческой деятельности;
- наиболее вероятно, что довольно быстрые, с геофизической точки зрения, инъекции радона в атмосферу зала (среднее время нарастания пиков до максимума около 8 часов) вызываются вибрацией грунта от автомобильного движения по двум транспортным туннелям, интенсивность которого зависит от рабочего времени;
- большие пики связаны с большей интенсивностью движения (одновременным прохождением туннелей многими машинами) и/или проездом тяжёлых грузовых машин, которых в выходные дни гораздо меньше, таким образом, можно говорить о пропорциональности

мощности выбросов радона в атмосферу в виде вибраций;

- радоновые пики образуются за счёт диффузии радона из слоя породы небольшой толщины и выхода из грунтовых вод; в последнем случае толщина радонопоставляющего слоя значительно увеличивается.



a) Большие пики ($A > 4$ Hz).



b) Малые пики ($A \leq 4$ Hz).

Рис.10 Распределение количества пиков по дням недели.

4. Заключение.

Сформулируем основной вывод данного этапа изучения вариаций концентрации радона на установке LVD: микросейсмический фон, создаваемый технической деятельностью, оказывает существенное влияние на состояние подпочвенных радоновых полей.

Этот вывод указывает путь, который может привести к методу выделения радоновых предвестников землетрясений. Техногенные

вибрации грунта ежедневно приводят к инжекции радона из подпочвенного слоя. Готовящееся сейсмическое событие за счёт деформации земной коры и предшествующих микротолчков способствует насыщению подпочвенного слоя радоном, постоянно образующимся в грунте. Таким образом, информация о предстоящем землетрясении может содержаться в амплитуде и мощности ($A/t_{\text{фронта}}$) техногенных радоновых пиков.

Пока были рассмотрены только временные характеристики. В настоящее время проводится амплитудно-временной анализ радоновых данных.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 00-02-16111, 00-02-16112).

Литература

1. LVD Collaboration (Aglietta M. et al.). The Most Powerful Scintillator Supernovae Detector: LVD. – II Nuovo Cimento, 1992, vol. 105A, N. 12, p. 1793 – 1804.
2. М.Алиетта и др. Известия РАН, серия физическая, т. 57 (1993), с. 127
3. Добрынина Е. А. Дипломная работа. МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, каф. космических лучей и физики космоса, 2001.