

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Физический факультет
Кафедра космических лучей и физики космоса

Дипломная работа

Студентки Добрыниной Е. А.

Исследование вариаций темпа счета больших подземных
сцинтилляционных установок
LVD и LSD выше порога 0,5 Мэв и детектирование радона под землей.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
А. С. Мальгин

Рецензент:

кандидат физико-математических наук
В. А. Алексеев

Москва
2001

СОДЕРЖАНИЕ.

ВВЕДЕНИЕ.

В.1. Задача прогнозирования землетрясений.....	3
В.2. Формирование гидрогеохимических предвестников.....	4
В.3. О проблемах прогноза землетрясений.....	6
В.4. Преимущества нового метода.....	7

ГЛАВА 1. Постановка эксперимента. Детекторы LVD и LSD.

1.1. Детектор Большого Объема (LVD).....	9
1.2. Жидкостный Сцинтилляционный Детектор (LSD).....	10
1.3. Сцинтилляционный счетчик детекторов LVD и LSD.....	11
1.4. Вариации темпа счета низкоэнергетического канала > 0,4 Мэв.....	13

ГЛАВА 2. Обработка экспериментальных данных.

2.1. Приведение данных к стандартному виду.....	17
2.2. Отбор событий.....	19
2.3. Идентификация отобранных событий.....	22

ГЛАВА 3. Анализ экспериментальных данных.

3.1. Временной анализ.....	28
3.2. О связи между радоновыми выбросами и землетрясениями.....	29

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	38
-----------------	----

ЛИТЕРАТУРА.....	39
-----------------	----

ВВЕДЕНИЕ.

В.1. Задача прогнозирования землетрясений.

Сегодня вопросы о прогнозировании катастрофических землетрясений угрожающих жизни людей стоят в числе крупных научных проблем. К сожалению универсального метода предсказания землетрясений все еще нет.

Современные методы прогноза землетрясений, относящиеся к литосферным исследованиям, основаны на наблюдении сравнительных изменений свойств горной породы и характера протекающих в ней физико-химических процессов. Под прогнозом понимается предсказание места, силы и времени возникновения будущих землетрясений, а также характера их проявления на поверхности Земли.

Особое внимание уделяется изучению гидрогеохимических (газового, макро- и микросостава, физических свойств) и гидрогеодинамических (уровня, давления и температуры) эффектов подземных вод. Во временных изменениях содержания радона, гелия, водорода, хлора, фтора, йода, брома и других элементов в подземных водах зафиксированы многочисленные аномалии, которые интерпретируются как предвестники землетрясений .

Исследования по выделению радоновых предвестников землетрясений проводятся во всем мире в течение нескольких десятилетий. Наблюдения показывают, что процесс подготовки сейсмических событий сопровождается изменением концентрации радона в атмосфере подпочв.

Приведем два случая аномальных выбросов содержания радона, зарегистрированных на наблюдательном пункте возле г. Ленинабада (ныне Худжанд) [5]. Газлийское землетрясение 19 марта 1984 г., $M=7,2$, по-видимому, нарушило структуру поля подпочвенного радона на громадной территории Средней Азии. Во всяком случае, поле подпочвенного радона, наблюдаемое в г. Ленинабаде (Худжанд) (600 км от эпицентра землетрясения), в области влияния Сырдарьинского

регионального глубинного разлома, начало претерпевать количественные и качественные изменения за месяц до сейсмического события (рис. 1,а), которое в месте наблюдения проявилось землетрясением силой 2,5—3,0 балла, эти изменения выразились в увеличении концентрации радона в атмосфере подпочвенных отложений, градиент которой последовательно нарастал на протяжении 25 дней до сейсмического события примерно на 264 имп./ч. Сейсмический удар произошел на фоне резкого роста содержания газа в атмосфере подпочв, достигшего максимальной концентрации накануне землетрясения.

Землетрясение 16 декабря 1983 г., $M = 6,1$, произошедшее на границе Таджикистана с Китаем, проявилось в г. Ленинабаде (на эпицентральной расстоянии 350 км) силой 2,5—3,0 балла. Землетрясение произошло на фоне постепенного уменьшения содержания радона в атмосфере подпочвенных отложений. За 1,5 суток ему предшествовал резкий всплеск содержания радона (рис. 1,б).

$^{222}_{86}\text{Rn}$ накапливается в грунте в результате распадов элементов ряда $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb}$. Уран распространен повсеместно и находится в вековом равновесии со своими продуктами распада. Концентрация $^{238}_{92}\text{U}$ в горных массивах составляет $\sim 10^{-7}$ г/г вещества. Таким образом, радон всегда присутствует в горных породах и в подземных водах, т.к. легко растворяется в воде.

В.2. Формирование гидрогеохимических предвестников.

Землетрясения служат показателем тектонической активности литосферы [2]. Необходимые для возникновения движений структурных элементов геодинамические условия создаются внутриземными и внеземными силами. Главный механизм возникновения землетрясения – дислокационный процесс (изменение формы залегания тел сдвиги течения и т.д.). Дислокационные зоны и прилегающие к ним геологические образования выступают областями активизации сейсмичности.

Сжатие, повышая напряжение в дислокационных зонах, совершает определенную работу. Прежде всего, при этом закрываются трещины и тормозится движение глубинных флюидов. Следовательно, объем

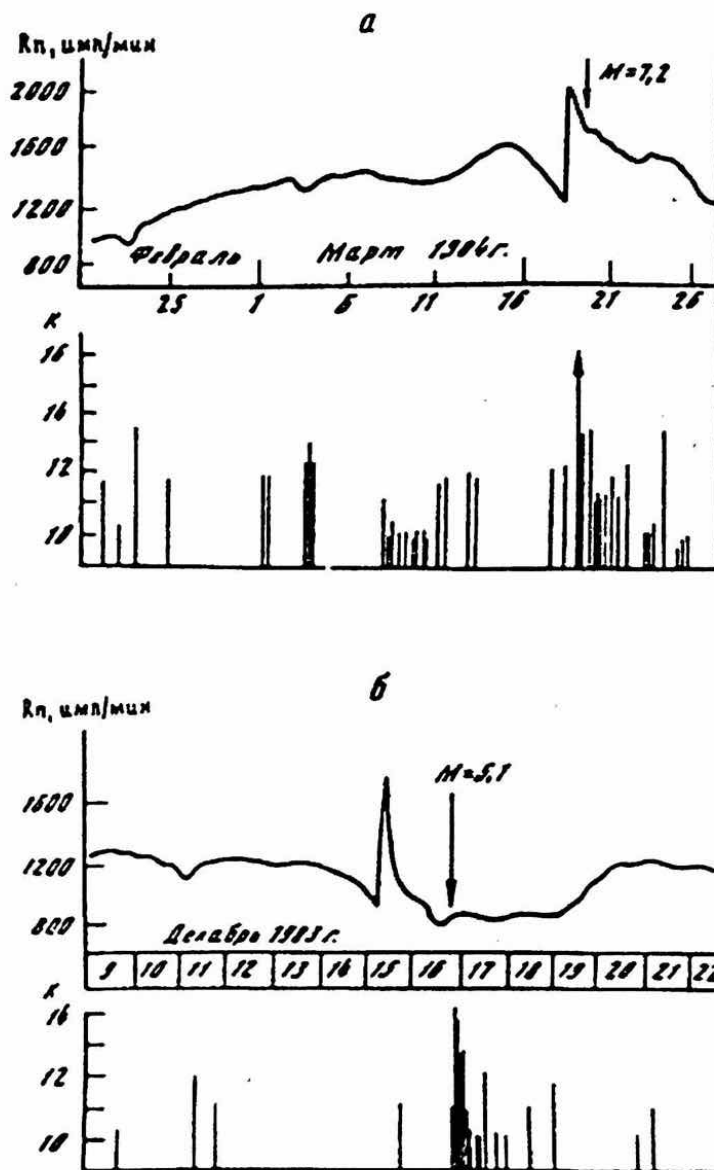


Рис.1. Аномалии в концентрации подпочвенного радона перед землетрясениями в Газли (а) и на границе Таджикистана с Китаем (б). Наблюдения проведены возле Ленинабада на эпицентральных расстояниях в 500 и 350 км, К – энергетические классы землетрясений. По [5].

подпочвенных растворов и газов накануне возникновения землетрясения может резко уменьшиться.

Однако, накапливаясь в более глубоких частях земной коры и верхней мантии, глубинные флюиды создают избыточные локальные напряжения, которые способствуют развитию деформации расширения, что может привести к ускорению перемещения залегающих выше горных пород.

Под действием сжимающих напряжений из дислокационных зон происходит отток жидкостей, освобождается поровое пространство. Закрытие или уменьшение пористости, трещин в породах высвобождает в окружающую среду растворы.

Дальнейшее увеличение внешнего давления приводит к упрочнению породы. Дальнейшее уплотнение (по достижении максимально возможной прочности) сопровождается химическими преобразованиями (растворение цементирующего вещества, минералов, выделение газов и т. д.). Таким образом, накануне сильного землетрясения избыточными усилиями флюиды выжимаются через современные активные разломы.

На заключительном этапе разрушаются силы сцепления между минералами, породами, пластами, т. е. происходит образование трещин сдвига, т.е. магистральный разрыв. Завершаются такие процессы разгрузкой накопленных напряжений, после чего горные породы приспособляются к возникшим в земной коре новым термодинамическим условиям.

В.3. О проблемах прогноза землетрясений.

Одним из главных препятствий применения геохимических методов для прогноза землетрясений является слабая изученность закономерности пространственно-временного распределения фоновых значений наблюдаемого параметра. Анализ экспериментальных материалов, полученных на территории Алма-Атинского полигона [2], показал, что воздействие внешних факторов создает гармоника в вариациях различных элементов. Например, отчетливо проявляется сезонность в вариациях Rn. Содержание радона в воде (родник Дегерес) весной (март, апрель, май) возрастает до 140 % (по отношению к

среднегодовому значению), а в скважине Курам (глубина водоносного горизонта 260м) — до 40 %. Выделение сейсмического эффекта из таких суммарных «аномалий» — задача непростая. Чтобы исключить влияние атмосферных и других поверхностных факторов на изменение состава и физические свойства, отбор проб подземных вод следует проводить из глубоких водоносных зон или горизонтов. Лишь при благоприятных условиях (отсутствие помех) удастся выделить «аномалии» в изменении гидрогеохимического поля.

Возникает вопрос: возможен ли принципиально прогноз момента наступления сильного или катастрофического землетрясения за несколько лет, месяцев, суток или часов?

Наступил период, когда стала очевидной необходимость обобщения накопленных данных о сейсмичности. В настоящее время существуют основы будущей теории — теории прогноза сейсмической опасности. Современные успехи науки позволяют предсказать периоды повышения сейсмической активности земной коры. Для этого необходим совместный анализ экспериментальных материалов, полученных при проведении комплексных наблюдений на прогностических полигонах.

Но, существующая методология прогностических исследований нуждается в корректировке. Дело в том, что на прогностических полигонах наблюдательная аппаратура размещена вблизи земной поверхности, поэтому полезная, с точки зрения сейсмологии, информация затушевывается помехами, обусловленными климатическими и другими факторами. Чтобы избавиться от них, измерительную аппаратуру необходимо устанавливать в глубоких скважинах, пробуренных не только в сейсмогенных узлах и зонах, но и в асейсмичных районах. Краткосрочные прогнозы времени возникновения и силы землетрясений могут быть выполнены по результатам комплексных исследований в таких локальных зонах.

В.4. Преимущества нового метода.

В настоящее время в качестве экспериментальной базы для изучения вариаций концентрации радона используются детекторы

небольших размеров, производящие точечные замеры концентрации радона по α -активности дочерних ядер радона. На показания радометров существенное влияние оказывают вариации концентрации радона, связанные с локальными выбросами радона, колебаниями температуры среды и перемешиванием воздуха. В связи с этим достоверный мониторинг состояния обширных радоновых полей по показаниям большого числа точечных детекторов практически невозможен.

Метод наблюдения вариаций концентрации радона с помощью подземных сцинтилляционных детекторов большого объема, регистрирующих γ -кванты, позволяет избежать указанных недостатков. Установки LSD и LVD работают в непрерывном режиме и имеют низкий энергетический порог около 0,5 Мэв. Большая эффективная поверхность детекторов делает измерения независимыми от локальных вариаций концентрации радона и определяет высокую статистическую обеспеченность результатов. Постоянство температуры в подземных помещениях позволяет исключить значительные температурные вариации концентрации радона. Действие вентиляции в помещениях всякий раз приводит темп счета установок к обычному уровню. Установки LSD и LVD находятся в 700 км друг от друга на одном геологическом разломе. Такое расположение установок позволяет охватить одновременными наблюдениями обширный сейсмоактивный район.

Настоящая работа состоит из введения, 3 глав и заключения.

В главе 1 приведены описания Большого сцинтилляционного детектора (LVD) и Жидкостного сцинтилляционного детектора (LSD).

В главе 2 приводится методика обработки данных и отбора интересующих нас событий.

В главе 3 представлены результаты обработки и анализа полученных экспериментальных данных.

В заключении сформулированы основные выводы.

ГЛАВА 1.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА. ДЕТЕКТОРЫ LVD И LSD.

Эти установки были созданы для изучения потоков частиц под землей. Основной задачей установок является регистрация нейтринного излучения, возникающего при гравитационном коллапсе звезд. Большая масса установок и хорошие фоновые условия позволяют проводить и другие исследования, относящиеся к задачам подземной физики: изучение характеристик ядерно-активной компоненты, генерируемой мюонами космических лучей под землей; исследование потоков атмосферных нейтрино; изучение процессов генерации мюонов высоких энергий и их взаимодействий и поиск редких явлений (распад протона, монополю).

1.1. Детектор Большого Объёма LVD.

Детектор Большого Объёма LVD (Large Volume Detector) находится в национальной подземной лаборатории Гран Сассо (широта $42^{\circ}27'$, долгота $13^{\circ}34'$), расположенной на глубине 3300 м.в.э. под одноименным горным массивом в центре Италии [8].

Основой LVD служат сцинтилляционные счетчики и трековая система, состоящая из газоразрядных трубок (резистивных камер). Детектор LVD (рис.2;3) имеет модульную структуру. Он разделен на 3 башни, в башне – 280 сцинтилляционных счетчиков. Каждая башня имеет размеры $13\text{м}\times 6,3\text{м}\times 12\text{м}$ и состоит из 5 колонн, содержащих по 7 модулей, расположенных друг над другом. Каждый отдельный модуль – это 8 сцинтилляционных счетчиков (рис.5) в металлической конструкции, окруженной с двух сторон плоскостями трековой системы. В настоящее время постоянно работают 2 башни (560 сцинтилляционных счетчиков) и заканчивается монтаж третьей. Описание сцинтилляционного счетчика

будет дано ниже (п. 1.3.), т.к. в установках LVD и LSD используются одинаковые счетчики.

Каждая из башен установки поделена на 4 четверти. После срабатывания системы регистрации (появление трекового или сцинтилляционного триггера) открываются каналы регистрации выше нижнего порога $>0,5$ Мэв всех сцинтилляционных счетчиков данной четверти.

Сцинтилляционным триггерным сигналом на запись информации является энерговыделение в любом из сцинтилляционных счетчиков, превышающее 5 Мэв. Фиксируется энергия триггерного импульса, время его появления и номер счетчика. Запоминаются также аналогичные характеристики импульсов $>0,5$ Мэв, следующих за триггером в течение 1мс. В итоге в памяти компьютера для каждого события формируются абсолютное время события, номера сработавших сцинтилляционных счетчиков и значения амплитуды импульса и времени прихода импульса для каждого сработавшего счетчика. Данные, используемые нами для исследования фона низкоэнергетических импульсов, формируются по-другому. Каждые 10 минут все сцинтилляционные счетчики башни открываются импульсом от генератора для регистрации низкоэнергетических импульсов в течение 10 секунд. Затем, данные за один месяц записываются на магнитные ленты и в таком виде хранятся.

1.2. Жидкостный сцинтилляционный детектор LSD.

Жидкостный сцинтилляционный детектор LSD (Liquid Scintillation Detector) расположен в подземной лаборатории Института космогеофизики (Турин, Италия), которая находится в транспортном туннеле между Италией и Францией под г. Монблан (широта $45^{\circ}51'$, долгота $6^{\circ}54'$) на глубине 5200 м.в.э. [7]. Установка (рис.4) состоит из 72 сцинтилляционных счетчиков, размером $1,5 \times 1,0 \times 1,0$ м³ каждый (рис.5). Счетчики разделены на три колонны по 24 счетчика в каждой. В колонне счетчики расположены на трех уровнях, по 8 счетчиков на уровне. Расстояние между уровнями – 40 см., между колоннами – 80 см. Полные размеры установки – $6,3 \times 8,0 \times 4,0$ м³.

Для уменьшения фона, связанного с естественной радиоактивностью породы, каждый счетчик с боковых и нижней граней окружен слоем железа толщиной 2 см. Кроме того, вся установка с боковых сторон окружена 2,2-см слоем свинца и 22-см слоем борированного парафина для уменьшения нейтронного фона. Сверху установки находится 30-см слой борированного парафина, 2,5-см слой железа и 1-см слой свинца, снизу - 8-см слой борированного парафина.

1.3. Сцинтилляционный счетчик детекторов LVD и LSD.

В установках LSD и LVD используются одинаковые сцинтилляционные счётчики. Счетчик (рис.5) представляет собой контейнер размером 1,5x1,0x1,0 м³, изготовленный из нержавеющей стали толщиной 4 мм и заполненный жидким сцинтиллятором. Счётчик содержит ≈1,2 тонны сцинтиллятора. Основу сцинтиллятора составляет уайт-спирит (C_nH_{2n}, n ≈9,6). Для увеличения светосбора внутренняя поверхность счетчиков покрыта слоем тонкой алюминизированной пленки с коэффициентом отражения ≈ 0,9 для λ=420нм. Длина поглощения света, в используемом сцинтилляторе составляет ≥16м на длине волны 420 нм (область максимальной светочувствительности используемых фотоумножителей).

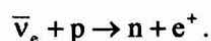
Регистрация света от возбужденных молекул, возникающих при прохождении заряженной частицы через сцинтиллятор, осуществляется при помощи трёх фотоумножителей ФЭУ-49Б, установленных на верхней грани счётчика. Диаметр фотокатода фотоумножителей равен 15 см. Для уменьшения неоднородности светосбора, связанной с близкими к фотокатоду вспышками, используются иллюминаторы из оргстекла толщиной 10 см. Шумовые импульсы фотоумножителей отсекаются тройной системой совпадений. Анализируется только суммарный сигнал трех ФЭУ от реального энерговыделения в счетчике.

Энергетическое разрешение счетчика можно вычислить по формуле:

$$\eta(E) = \frac{0,55}{\sqrt{E(\text{МэВ})}} + 0,13 \quad .$$

В энергетическом диапазоне 0,6 – 2,5 МэВ это составляет 84% – 47%.

Основной реакцией взаимодействия антинейтрино с веществом детекторов LSD и LVD (водородосодержащий сцинтиллятор) является реакция обратного β -распада:



Образовавшийся нейтрон замедляется и захватывается на свободном протоне, в результате чего образуется ядро дейтерия в возбужденном состоянии. Среднее время жизни нейтрона до захвата в счетчике LVD $\tau \approx 190$ мксек. Возбуждение дейтрона снимается испусканием γ -кванта с энергией $E_\gamma = 2,2$ Мэв:



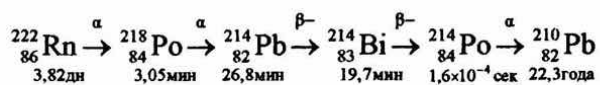
Таким образом, при взаимодействии антинейтрино с протоном сцинтиллятора регистрируется два сигнала : первый связан с регистрацией позитрона, второй - с регистрацией γ -кванта.

Верхние триггерные пороги регистрации, также как и нижние, внутренних и наружных счетчиков отличаются в два раза: 4 и 8 Мэв, 0,4 и 0,8 Мэв, соответственно. Величина нижнего порога выбиралась из соображений эффективной регистрации γ -кванта энергии 2,2 МэВ от захвата нейтрона в условиях фона естественной радиоактивности породы.

1.4. Вариации темпа счета низкоэнергетического канала >0,4 Мэв.

Темп счета низкоэнергетического канала никогда не равен нулю. Детекторы постоянно регистрируют фоновые энерговыделения. Основным источником фона являются радиоактивные элементы уранового и ториевого рядов, которые в результате распадов и деления дают γ -кванты, электроны, нейтроны. ^{238}U и ^{232}Th содержатся как в окружающей породе, так и в материалах установок. Вклад в фон дает также ^{222}Rn и его продукты распада. Они образуют γ -кванты, электроны. Радон не только присутствует в горной породе, но и приносится в помещения подземными водами.

Период полураспада $^{222}_{86}\text{Rn}$ составляет 3,82 дня. Наиболее вероятная цепочка распада:



Основным источником γ -квантов являются возбужденные ядра $^{214}_{83}\text{Bi}$.

$^{214}_{83}\text{Bi}$ переходит из возбужденного состояния в основное с испусканием γ -квантов. Они регистрируются счетчиками, т.к. имеют энергии выше 0,6 Мэв. γ -кванты проникают в сцинтилляционные счетчики, главным образом, через верхнюю грань площадью $1,5 \text{ м}^2$, которая выполнена из 4-х миллиметровой стали. Другие грани защищены 2-мя сантиметрами железа, что значительно снижает поток "радоновых" γ -квантов, проникающих в счетчики.

В таблице 1 приводится весь 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

Табл. 1. Спектр γ -квантов от $^{214}_{83}\text{Bi}$.

В результате ^{ста} 100 распадов возбужденного ядра $^{214}_{83}\text{Bi}$ ^{выпускается} получается 108 γ -квантов.

Темп счета низкоэнергетического канала не постоянен. Его вариации связаны с: а) электромагнитными помехами, б) нестабильностью работы фотоумножителей, в) вариациями концентрации радона в атмосфере помещения. Электромагнитные помехи создают высокочастотные аperiodические вариации, легко исключаемые из рассмотрения по их форме. Нестабильность режимов ФЭУ приводит к вариациям темпа счета отдельных счетчиков и также просто исключается из анализа по аномальному отклонению темпа счета данного счетчика от его средней величины.

Вариации концентрации радона можно разделить на две группы: длиннопериодические, связанные с сезонными и суточными вариациями концентрации радона и аperiodические, имеющие формы пиков на счетной характеристике установки. Последние связываются с выбросами радона, появляющимися вследствие подготовки сейсмических событий. Пики просматриваются одновременно на счетных характеристиках всех счетчиков и имеют особенную форму – достаточно быстрое нарастание (6 – 8 часов) до величины, в 1,5 – 2 раза превышающей средний темп счета и экспоненциальный спад, объясняющийся действием вентиляции в подземном зале.

ГЛАВА 2.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.

2.1. Приведение данных к стандартному виду.

Для сравнительного анализа данные с LSD и LVD были приведены к единому формату. Являясь одинаковыми по методу регистрации, установки отличаются фоновыми условиями и количеством счетчиков, из которых они состоят.

Темп счета низкоэнергетического канала измеряется каждые десять минут. Сбор информации продолжается десять секунд. Естественно, что при анализе данных удобнее всего пользоваться величиной скорости счета, т.е. количеством импульсов в секунду.

Для того чтобы исключить влияние сбоев в работе отдельных счетчиков был проведен их отбор. Были построены распределения темпа счета каждого счетчика обеих установок. В построении использована годовая статистика. Распределения выявили нестабильно работающие счетчики, разброс по темпу счета у которых оказался слишком велик. На рисунке 6 представлены примеры хорошей работы счетчиков и нестабильно работающих.

Таким образом, в результате просмотра этих распределений были определены границы величины скорости счета стабильно работающих счетчиков. На установке LVD темп счета отдельного счетчика должен попадать в рамки от 1 имп./сек. до 500 имп./сек., а для LSD: от 0,1 имп./сек. до 1000 имп./сек. Но если полностью исключить из анализа все счетчики, которые давали темп счета не попадающий в эти границы хотя бы раз, то статистика резко уменьшится. Для получения высокой статистики данные с каждого конкретного счетчика не использовались только тогда, когда они в течение данного 10-секундного измерения выходили за указанные выше рамки. При этом были полностью исключены 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).

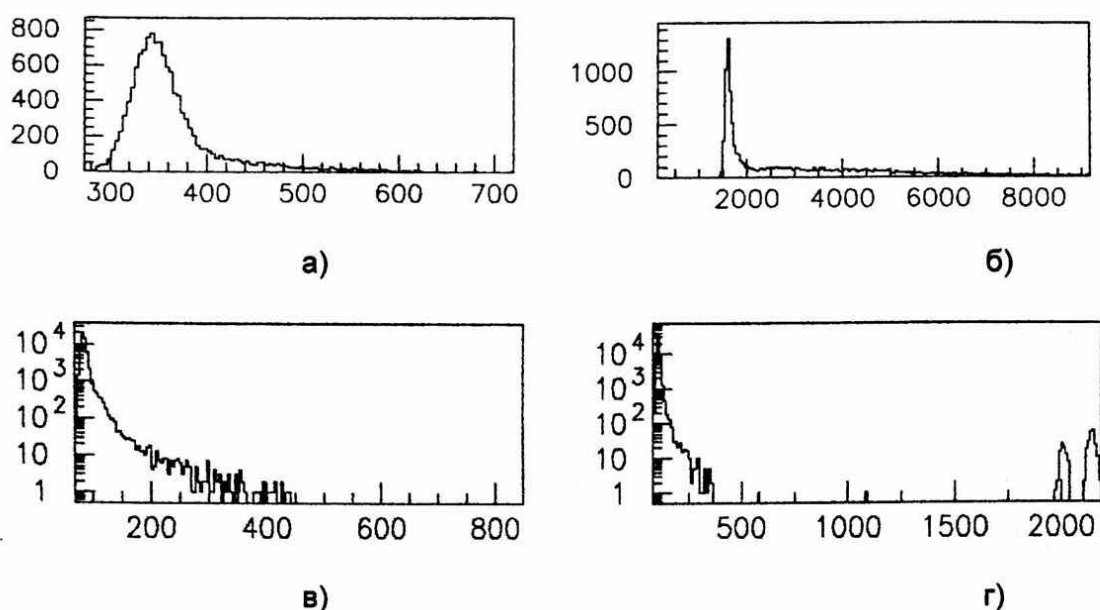


Рис. 6. Примеры хорошей работы счетчиков а) установки LVD,

в) установки LSD

и нестабильно работающих счетчиков б) установки LVD,

г) установки LSD.

По оси абсцисс: количество отсчетов в данном счетчике а), б) за

10 сек и в), г) в 1/сек.;

по оси ординат: количество 10-секундных интервалов.

Также были полностью исключены восемь счетчиков установки LSD, нестабильно работающие в течение длительного времени. Таким образом, количество счетчиков, дающих вклад в общий темп счета, установки изменяется. Их количество варьируется от 60 до 76 на LVD и от 60 до 64 на LSD.

Итак, в результате данные каждой установки представляются в виде суммарного по всем стабильно работающим счетчикам темпа счета фоновых импульсов в секунду, нормированного на один счетчик. В анализ включались только внутренние счетчики детектора LVD. При анализе данных LSD учитывались стабильно работающие счетчики из их полного числа.

2.2. Отбор событий.

Следуя описанной методике, были обработаны данные с детекторов LVD и LSD за 1997 год. На рисунках 7 и 8 показаны примеры наглядного представления обработанных данных в виде зависимости темпа счета на один счетчик от времени.

Для увеличения статистической значимости каждой точки и для удобства восприятия данные усреднены по часу. Каждый часовой бин содержит ~ 200 тыс. импульсов для LVD и ~ 600 тыс. импульсов для LSD. Отсюда следует, что относительная погрешность каждой точки составляет для LVD $\delta=0,2\%$ и $\delta=0,1\%$ для LSD.

Как было отмечено выше, величина скорости счета фоновых импульсов не постоянна, она медленно изменяется со временем. Причиной этому может служить не только изменения в работе установок, но и вариации фона. Например, они могут быть обусловлены медленными изменениями концентрации радона (чаще уменьшением), которые являются долгосрочными предвестниками землетрясений и могут длиться недели и даже месяцы. Если принимать во внимание только длиннопериодические, более нескольких суток, вариации темпа счета, то для LVD величина фона колеблется от 42 имп./сек.счетчик до 45 имп./сек. счетчик, а для LSD - от 182 имп./сек.счетчик до 185 имп./сек.счетчик. Существенная разница в этих величинах объясняется тем, что установки находятся в различных фоновых условиях.

Для проведения компьютерного отбора радоновых событий (пиков) был определен средний темп счета установок за год, включающий в себя и "радоновые" пики. Для LVD средний темп счета за 1997 год составил 45,9 имп./сек.счетчик, а для LSD – 187,7 имп./сек.счетчик. Исходя из этих величин, был выбран критерий отбора событий. Пиком считалось всякое превышение усредненного за 1 час темпа счета над среднегодовым на 0,1 имп./сек.счетчик, что составляет, учитывая очень малую относительную погрешность каждой точки, более 10σ . Длительность такого превышения должна быть не менее двух часов.

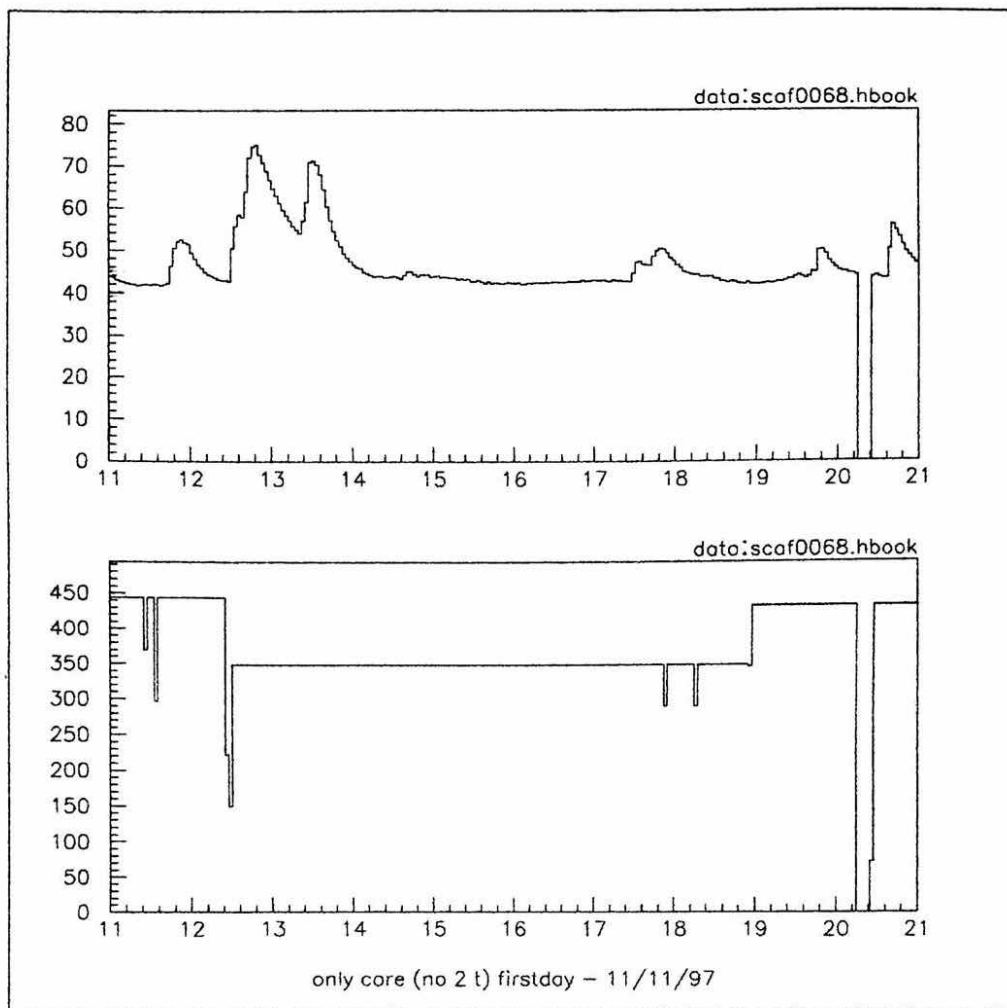


Рис. 7. Пример представления обработанных данных для установки

LVD.

По оси абсцисс отложена дата (в данном случае с 11 по 21 ноября 1997 года);

по оси ординат: на верхнем рисунке – темп счета установки в 1/сек.счетчик;

на нижнем рисунке – количество счетчиков, данные с которых учитывались в суммарном темпе счета за час.

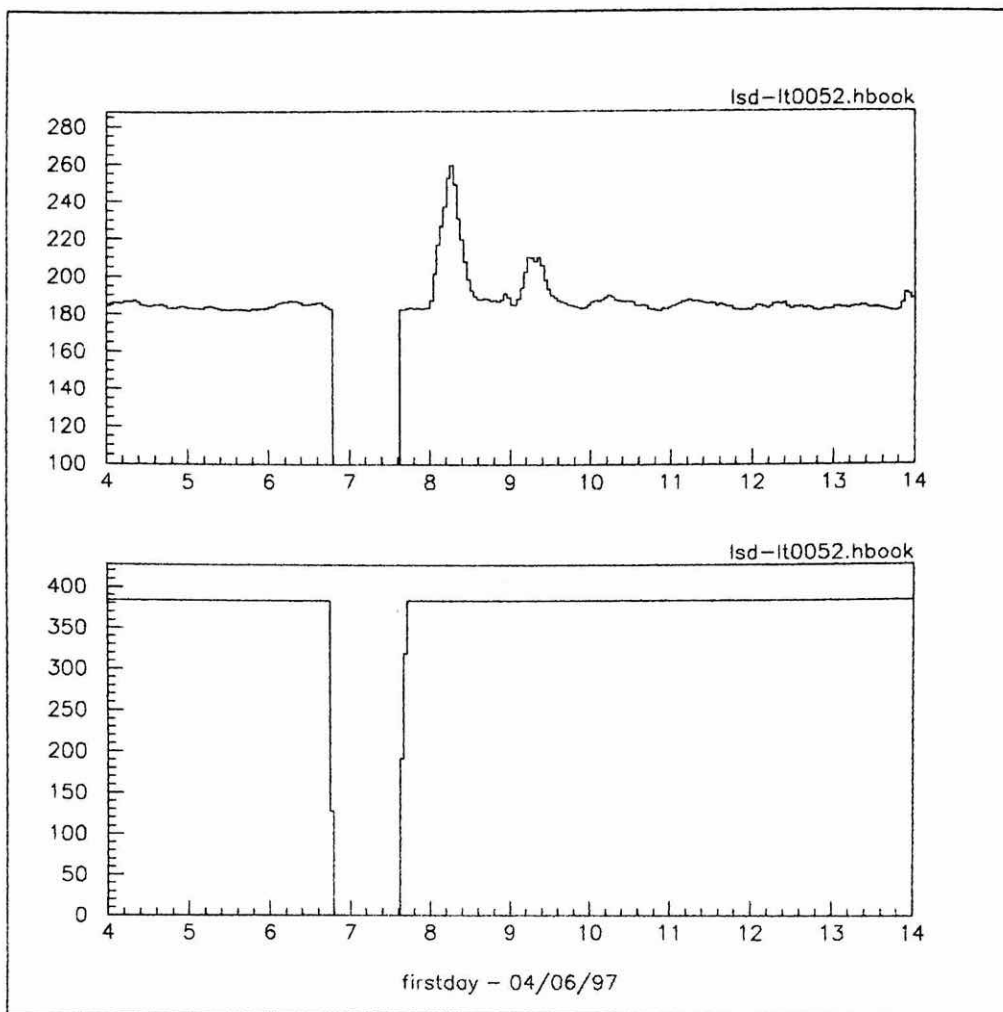


Рис. 8. Пример представления обработанных данных для установки LSD.

По оси абсцисс отложена дата (в данном случае с 4 по 14 июня 1997 года);

по оси ординат: на верхнем рисунке – темп счета установки в 1/сек.счетчик;

на нижнем рисунке – количество счетчиков, данные с которых учитывались в суммарном темпе счета за час.

У пиков короткое время нарастания (около 6 часов), поэтому, принимая за время начала пика время первого превышения над средним, мы можем ошибиться в определении прихода события не более чем на час. По этому критерию было отобрано за 1997 год из данных LVD – 144 пика, из данных LSD – 158 пиков.

2.3. Идентификация отобранных событий.

Появление пиков на счетной характеристике фона обусловлено выбросами радона. Это утверждение основано на: а) характерной форме спада пиков; б) одновременности появления пиков в данных LVD и показаниях радометра, помещенного внутрь установки (это относится к тем пикам, которые “видят” и LVD и радометр, поскольку есть пики, регистрируемые только установкой LVD). Данные с LVD и показания радометра за тот же период времени представлены на рисунках 9 и 10 соответственно.

Как уже отмечалось выше, пики имеют характерный экспоненциальный спад. Величина $\tau_{\text{экс}}$ определяется временем жизни радона $\tau = 5,5$ дня и выдувом радона из подземного зала приточной вентиляцией. Определяющим фактором является вентиляция, т.к. время жизни радона много больше, чем время, его выдува из помещения. Действие вентиляции различно в помещениях, где расположены установки LVD и LSD.

Приведем расчет величины τ_v для LVD, которая соответствует уменьшению концентрации радона в экспериментальном зале за счет действия вентиляции.

Введем обозначения: C – концентрация радона в зале “А”;

F – поток входящего воздуха, $F = 8000 \text{ м}^3/\text{час}$;

V – объем зала “А” без оборудования, 22000 м^3 ;

N – количество ядер радона в объеме V .

Поскольку вентиляция приточно–принудительная, т.е. создается за счет избыточного давления нагнетаемого наружного воздуха, то

$$F_{\text{вход}} = F_{\text{выход}}.$$

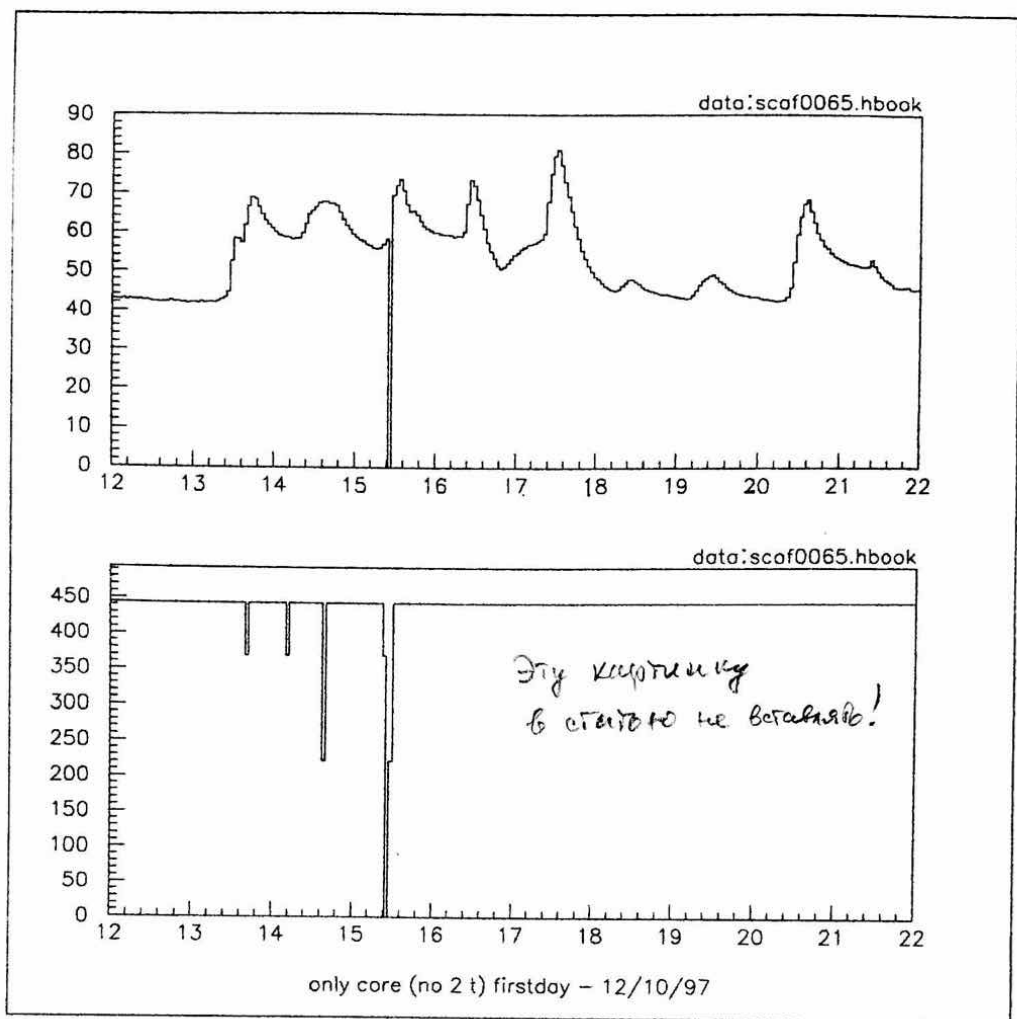


Рис. 5а (в статье)



Рис. 9. Данные ~~с~~ установки LVD за 12 – 22 октября 1997 года.

По ~~оси абсцисс~~ ^{ось абсцисс →} отложена дата;

по ~~оси ординат~~ ^{ось} на верхнем рисунке – темп счета установки в 1/сек. счетчик.

на нижнем рисунке – количество счетчиков, данные с которых учитывались в суммарном темпе счета за час.

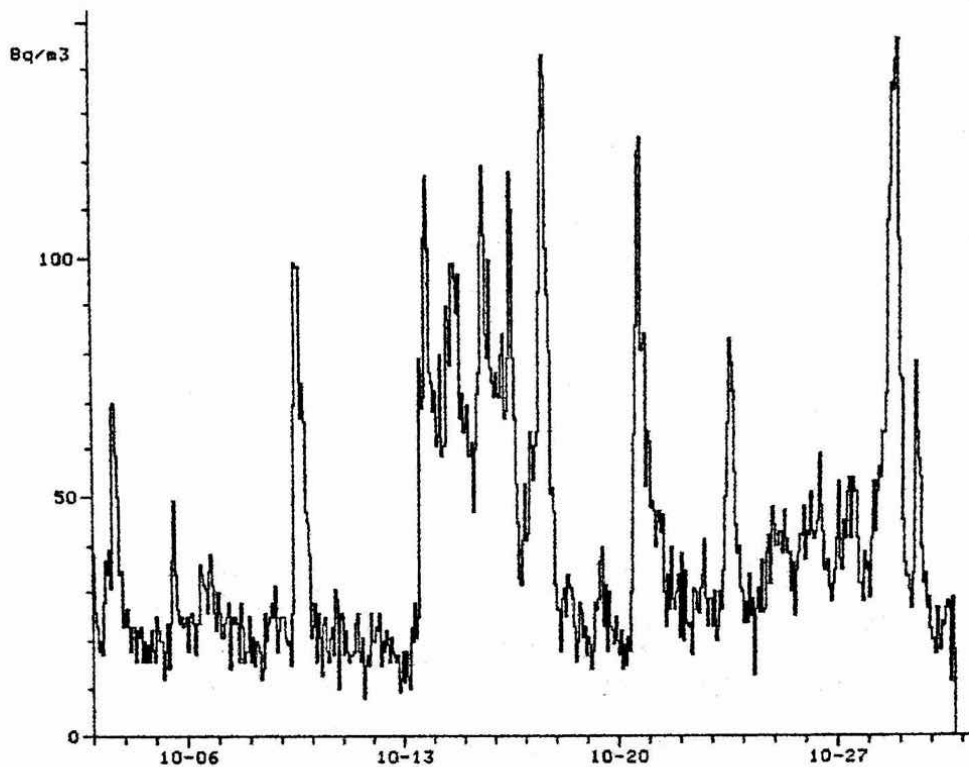


Рис. 5в (в статье).



Рис. 10. Данные ~~х~~радометра, помещенного внутрь установки LVD за 3 - 31 октября 1997 года.

По ~~оси~~ абсцисс отложена дата; ← ось абсцисс - дата ;
^{ось}
 по ~~оси~~ ординат - концентрация радона в помещении в Бк/м³.

Допустим, что для входящего воздуха концентрация радона $C = 0$.

Уменьшением концентрации радона за счет распада пренебрегаем,

т.к. предполагаем, что $\tau_{Rn} \gg \tau_v$.

$$C_1 = \frac{N_1}{V} - \text{концентрация в момент } t_1;$$

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

Предполагаем, что Δt мал и концентрация радона C в течение этого времени постоянна, тогда $\Delta N = C_1 \cdot F \cdot \Delta t$. В этом случае

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

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 имеем: $C(t) = C_0 e^{-\frac{F}{V} t} = C_0 e^{-\frac{t}{\tau_v}}$, где $\tau_v = \frac{V}{F}$.

Величина $\tau_v = 22000 \text{ м}^3 / 8000 \text{ м}^3 \text{ час}^{-1} = 2,75$ часа.

На рисунке 11 показана форма спада усредненных пиков для LVD и LSD. На обеих кривых виден излом при $t = 3$ часа. Область до излома можно объяснить совместным действием вентиляции и продолжающимся выходом радона. После излома – только выдувом радона из атмосферы помещения. На рисунке 12 показана форма спада после излома усредненных пиков для LVD и LSD. Экспериментальная величина τ составляет 3,5 часа для LVD и 2,0 часа для LSD. Расчетная величина τ_v экспоненциального спада радонового пика меньше полученной из экспериментальных данных на 20% (2,75 и 3,5 часа). Это можно объяснить влиянием неидеального перемешивания вдуваемого воздуха в зале "А" из-за присутствия оборудования (установки LVD и GALLEX) и малости соотношения сечений трубы, подводящей воздух, и зала "А":

$$\frac{S_T}{S_A} \approx 5 \cdot 10^{-3}.$$

$$\tau = \frac{600}{\chi} = 2$$

$$\chi = 300 \text{ м}^2 \text{ час}^{-1}$$

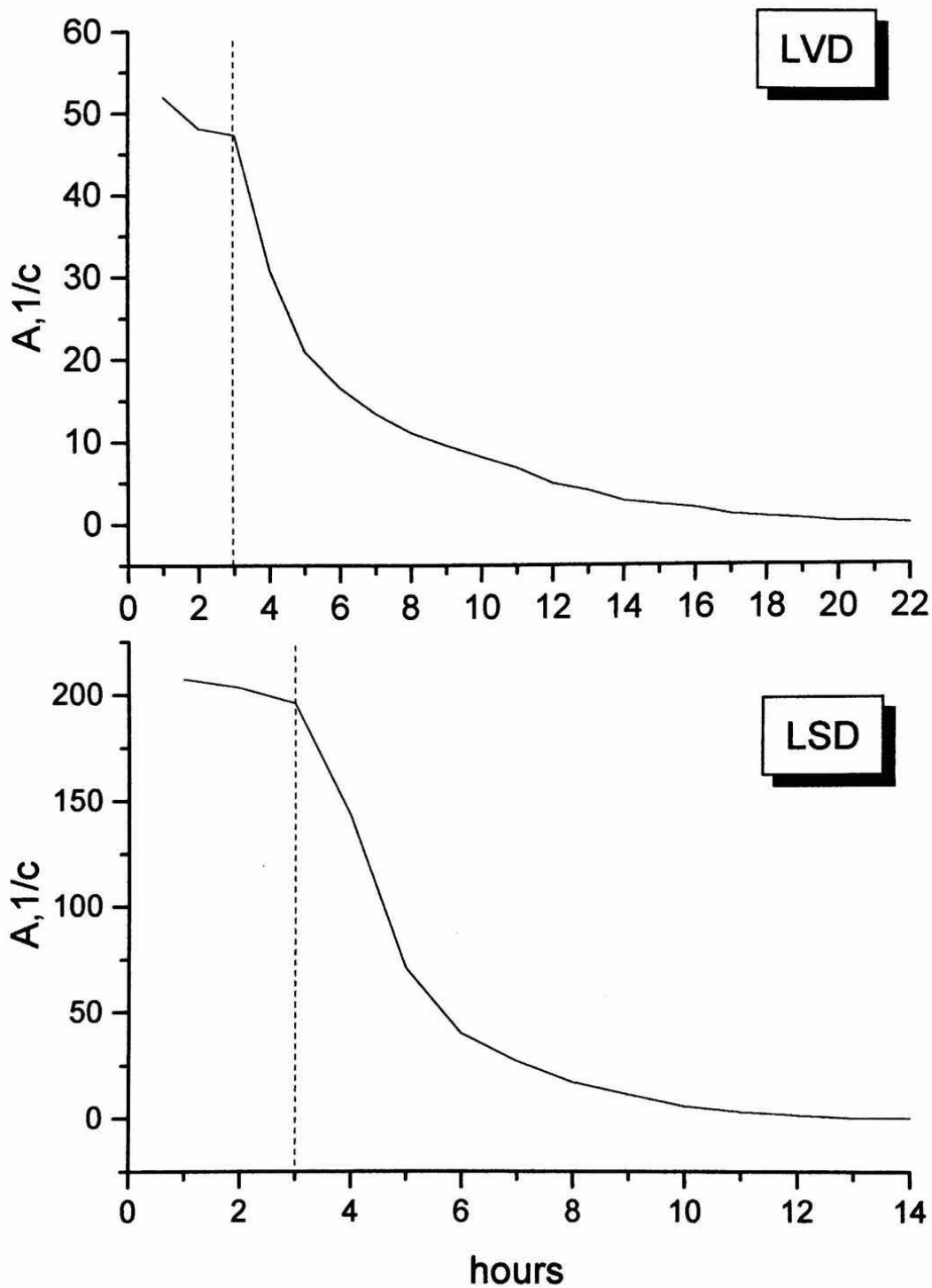


Рис. 11. Форма спада усредненного пика для установок LVD и LSD.

По оси абсцисс – часы от максимума пика.

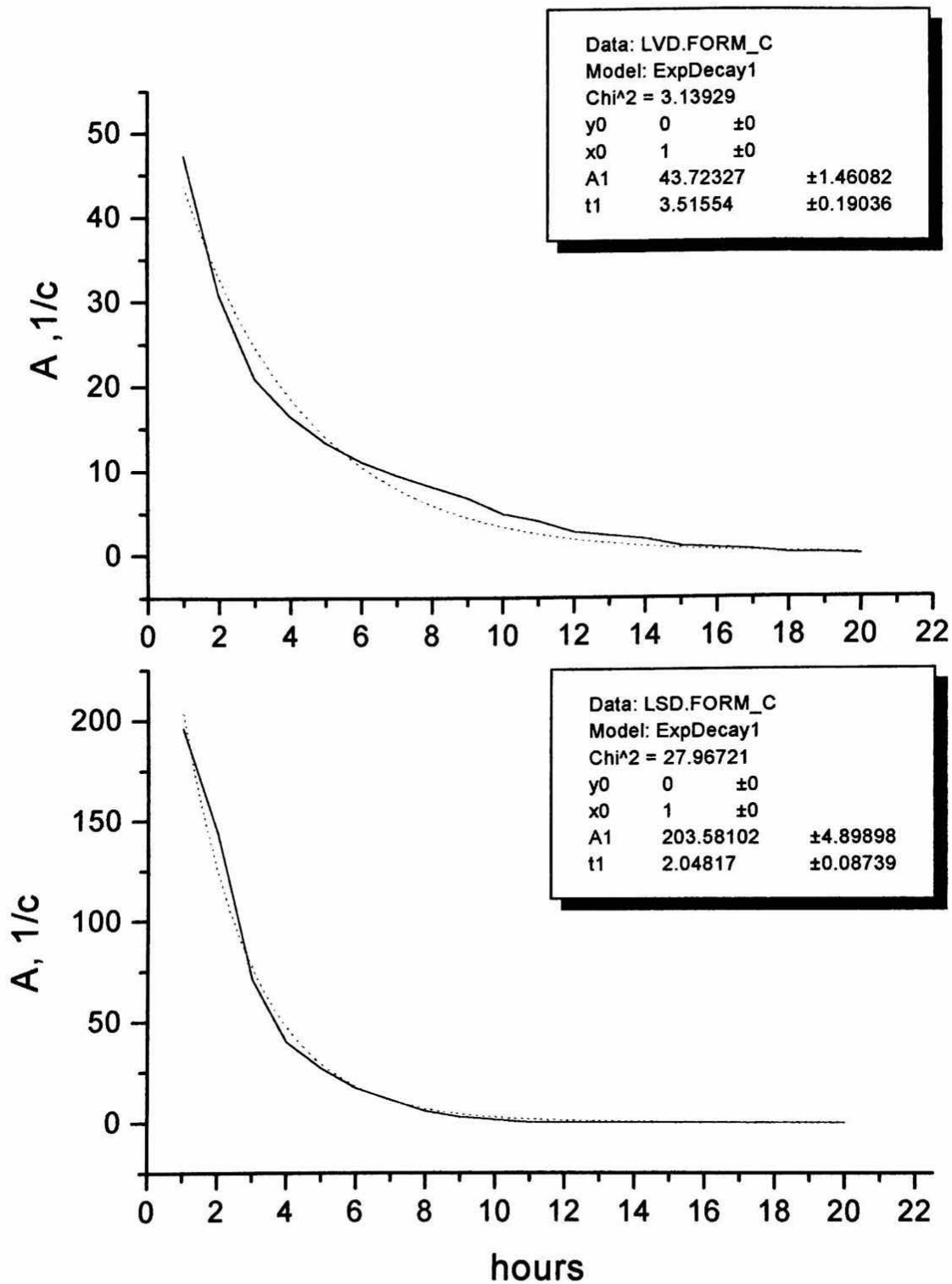


Рис. 12. Форма спада усредненного пика после излома для установок LVD и LSD. По оси абсцисс – часы после излома.

Штриховкой нанесена аппроксимация $y = y_0 + A_1 e^{-\frac{x-x_0}{t_1}}$.

ГЛАВА 3.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.

3.1. Временной анализ.

Был проведен статистический анализ радоновых событий, зарегистрированных установками LVD (144 события) и LSD (158 событий) в 1997 году.

1). Получены распределения временных интервалов между двумя последовательными событиями. На рисунке 13 приводятся вид этих распределений. На их основании можно сделать следующие выводы: во-первых, формы обоих распределений отличаются от случайного (пуассоновского) распределения, имеющего экспоненциально спадающий вид; во-вторых, несомненное сходство этих распределений указывает на связь LVD, LSD-данных между собой и выявляют коррелированный характер изменений радоновых полей на базе 700 км (расстояние между установками); в-третьих, наличие максимумов в районе 24 часов подтверждает наблюдения о том, что радоновые пики возникают чаще всего группами. Группа состоит из 2 – 3 пиков, которые идут друг за другом с интервалом в сутки (средние интервалы для LVD и LSD – 2,5 и 3,5 суток, соответственно).

2). Методом “наложения эпох” получены зависимости темпа счета установки от времени суток и дня недели. Обращают на себя внимание суточные и недельные вариации темпа счета. Для выяснения причин такого поведения, был проведен временной анализ фона за вычетом пиков. На рисунке 14 приводится зависимость темпа счета фоновых импульсов от времени суток и дня недели. Можно увидеть, что вариации сильно уменьшились, хотя и не исчезли совсем. Однако существует сложность в отделении эффекта от фона, в результате чего фон под пиками может остаться завышенным.

Таким же образом получено распределение времен возникновения пиков по времени суток и дням недели. На рисунках 15 и 16 показаны эти распределения. Здесь особенно заметна корреляция времени выбросов с часом суток и днем недели. При этом положение максимумов

распределений различно на установках LVD и LSD. На распределении землетрясений по времени суток (рисунок 17) не наблюдается подобной зависимости. Если учесть еще отличие в положениях максимумов, то можно предположить, что этот эффект связан с особенностями проникновения радона в помещения, где находятся установки, а также с работой вентиляции, действие которой различно на LVD и LSD.

Рассмотрим подробнее особенности распределения радоновых пиков. На LVD максимальное количество выбросов попадает на рабочее время в рабочие дни. Это можно объяснить тем, что в рабочее время открывается сообщение с неветилируемыми помещениями, в которых концентрация радона выше, чем в экспериментальном зале. На установке LSD существует обратная зависимость. Максимальное количество выбросов попадает на ночное время, причем больше пиков в воскресенье. Вероятно, это является результатом того, что вентиляция на LSD в основном зависит от вентилирования транспортного туннеля, рядом с которым находится установка. По-видимому, вклад радоновых пиков искусственного происхождения значителен. В дальнейшем необходимо провести исследования для отделения фоновых радоновых пиков, связанных с деятельностью людей, от реальных геофизических, связанных с сейсмической активностью.

3.2. О связи между радоновыми выбросами и землетрясениями.

Следует отметить, что, несомненно, существует связь между радоновыми выбросами и землетрясениями. Например, перед сильными землетрясениями в Италии в сентябре 1997 года на установках появились радоновые пики, количество которых часто возрастает после начала основных толчков (рис. 18 и 19). Удачное расположение установок позволяет чувствовать землетрясения, происходящие не только на Апеннинском полуострове, но и много дальше. Также отмечалось появление пиков до сильных землетрясений в Турции и Греции в 1999 году. Еще предстоит выяснить, на каком максимальном расстоянии установки смогут почувствовать готовящееся землетрясение.

Кроме того, предстоит установить, существует ли связь между характеристиками радоновых выбросов (такими как мощность, кратность)

и характеристиками землетрясений (сила, координаты). В идеальном случае прогнозирование включает в себя предсказание всех характеристик землетрясения: время, координаты эпицентра, силу. Возможно, только кратковременных и длиннопериодических вариаций радоновых потоков под землей будет недостаточно для уверенного предсказания сильного землетрясения и понадобится привлечение дополнительных данных по состоянию земной коры (напряжения в грунте), концентрации аэрозолей в атмосфере и состоянию ионосферы в сейсмоактивных районах.

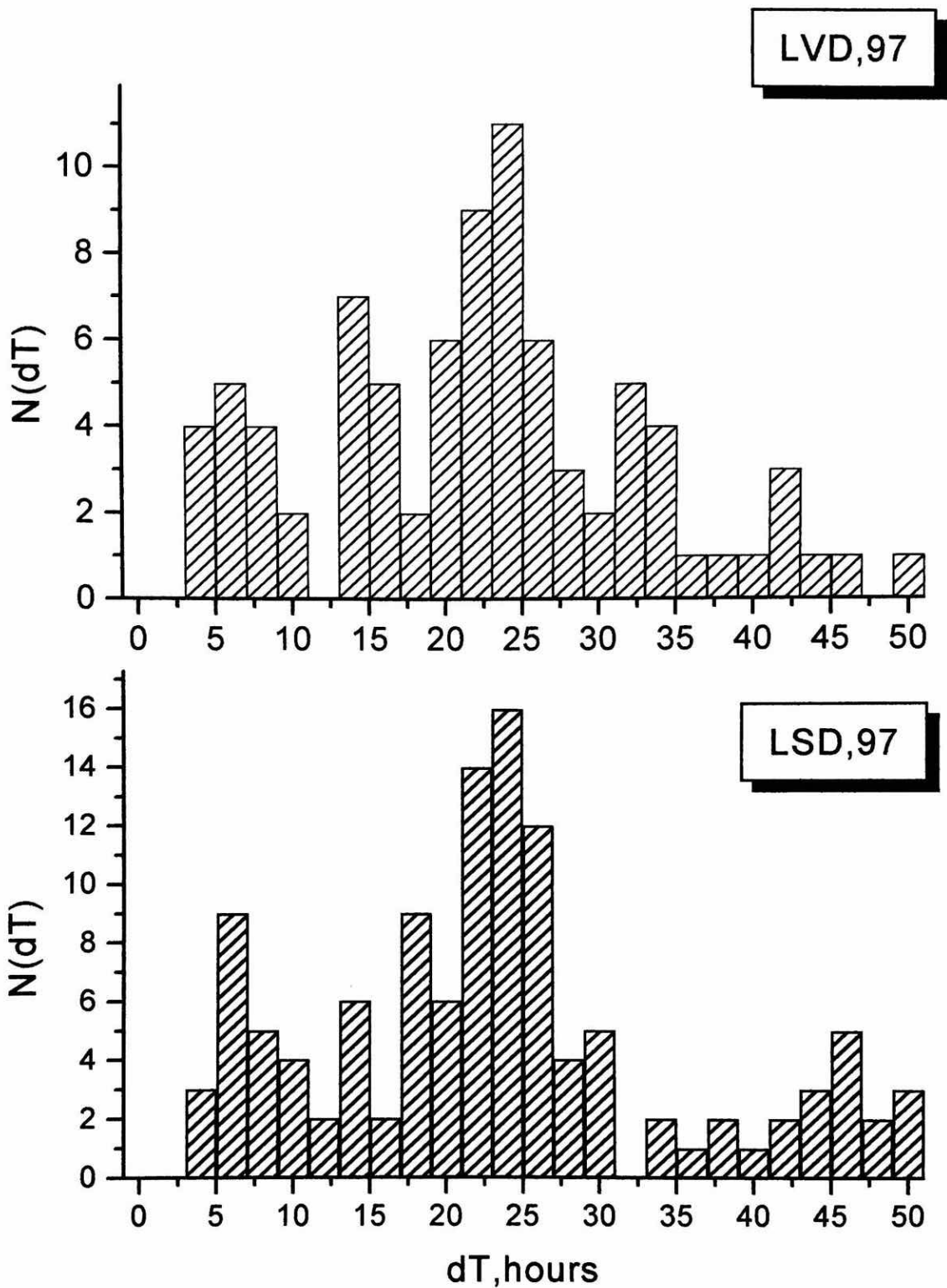


Рис. 13. Распределение временных интервалов между двумя последовательными событиями на установках LVD и LSD.

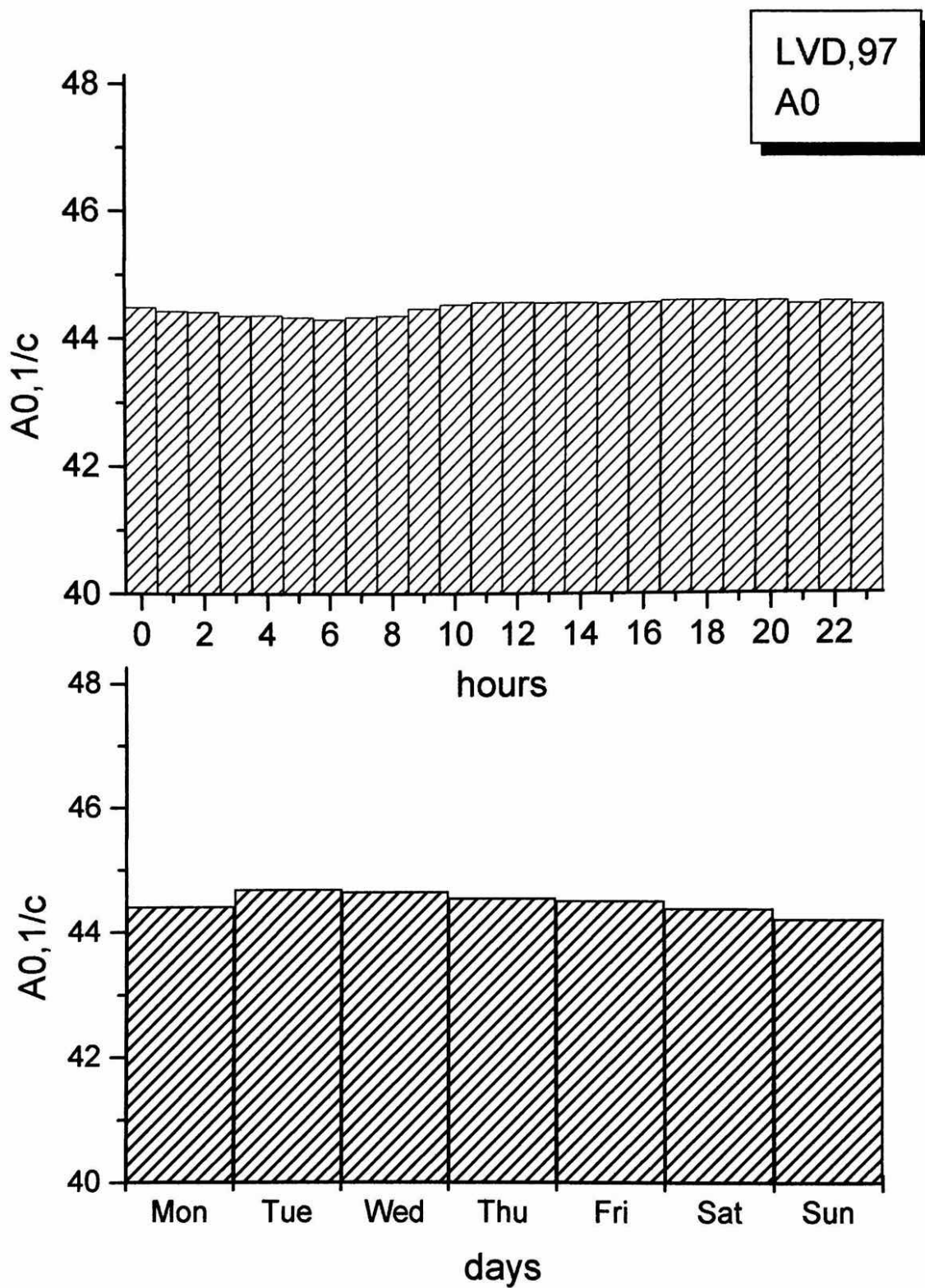


Рис. 14. Темп счета фоновых импульсов установки LVD в зависимости от времени суток и дня недели.

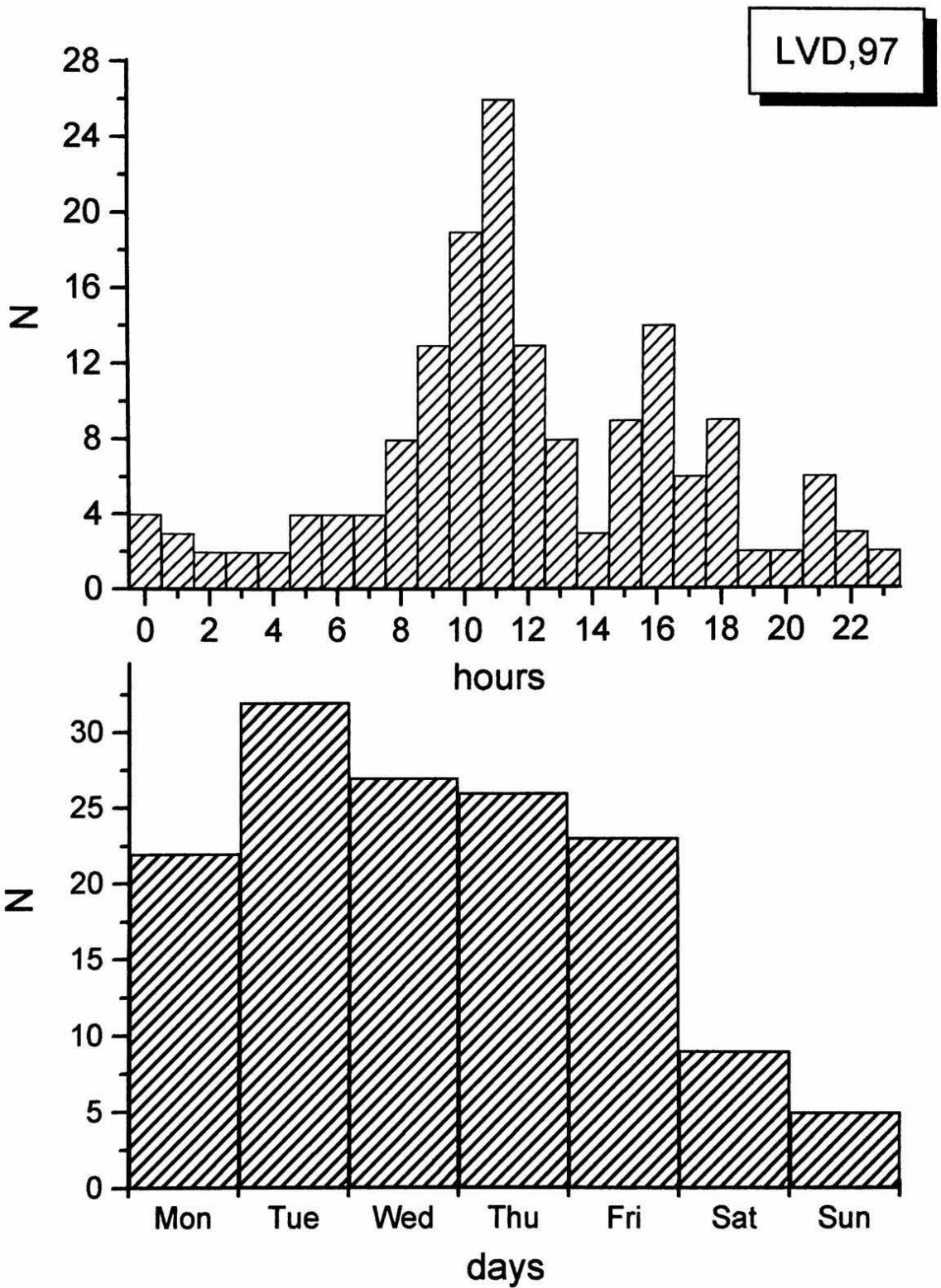


Рис. 15. Зависимость количества пиков, появляющихся на установке LVD, от времени суток и дня недели.

LSD,97

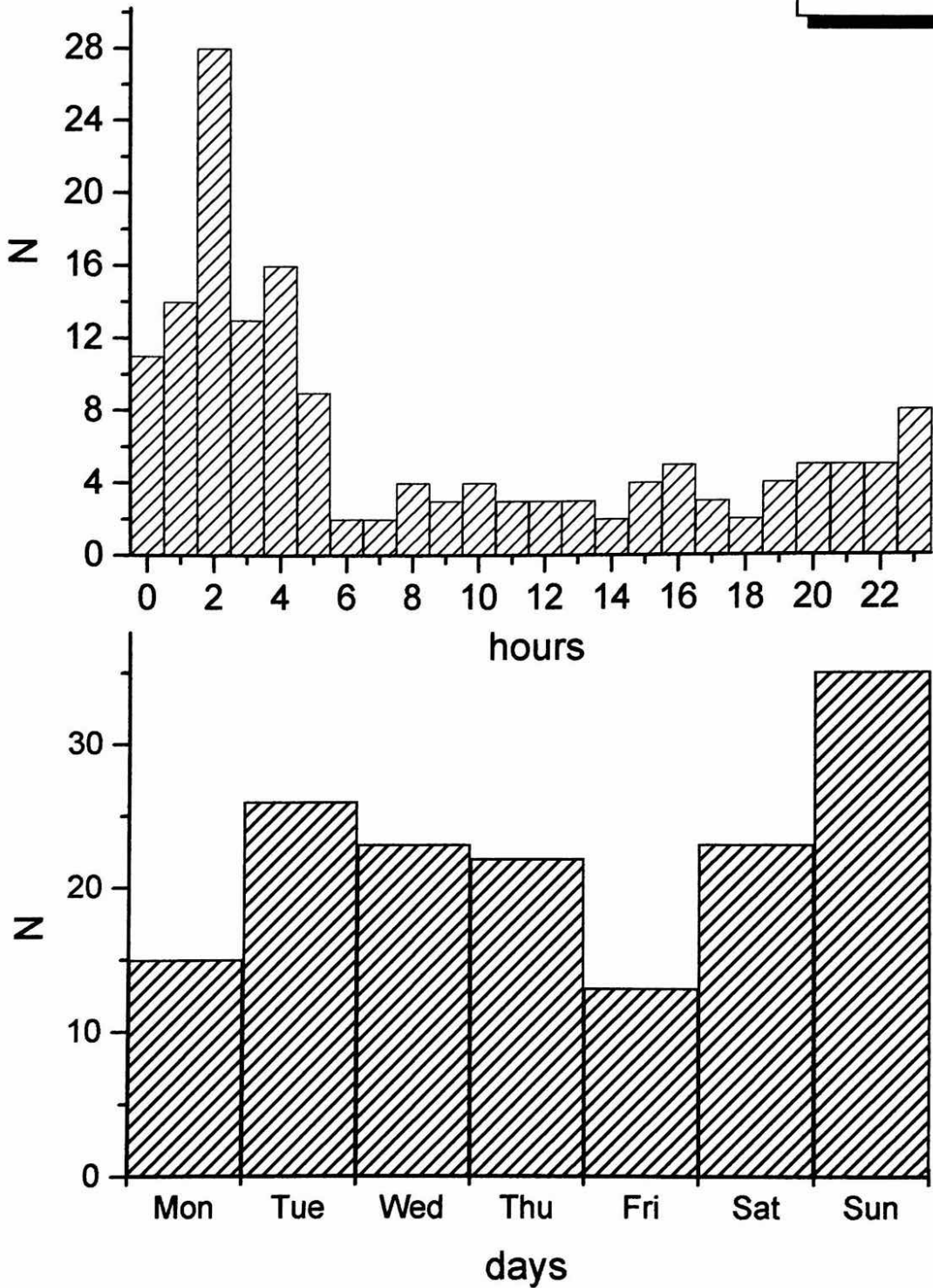


Рис. 16. Зависимость количества пиков, появляющихся на установке LSD, от времени суток и дня недели.

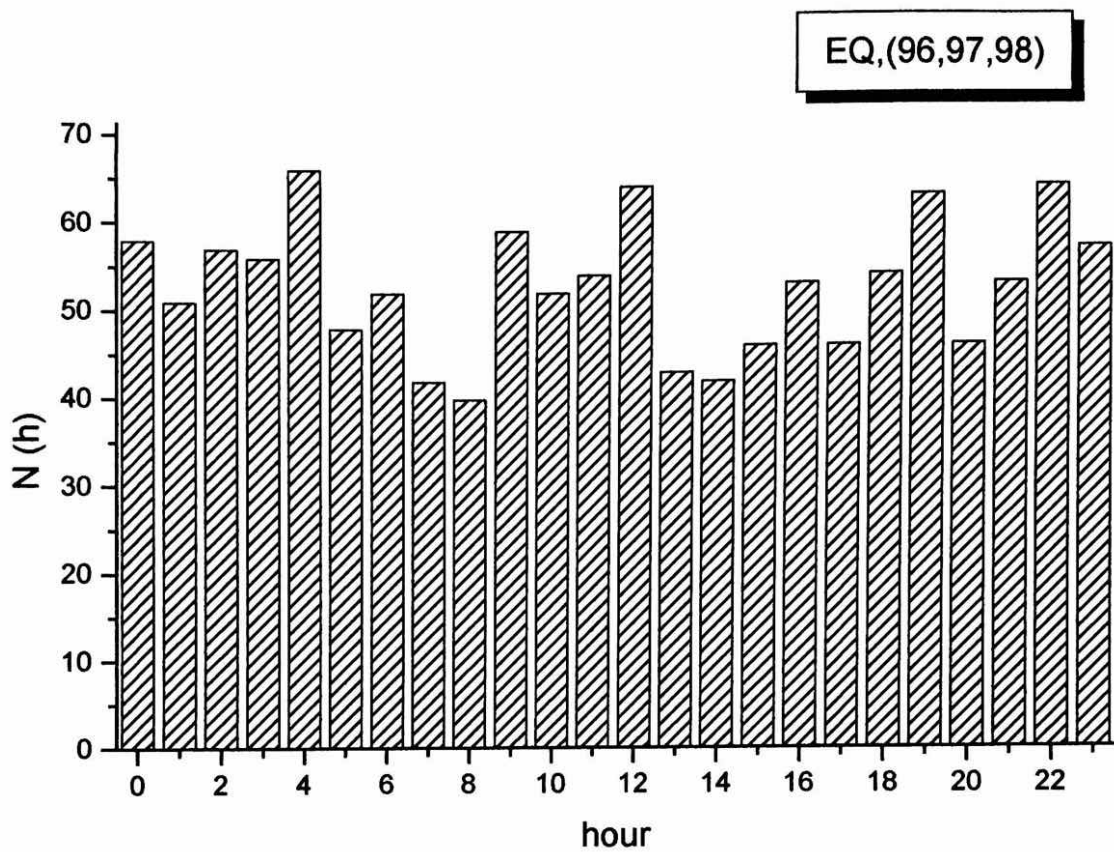


Рис. 17. Зависимость количества толчков от времени суток.
Учитывались только итальянские землетрясения.

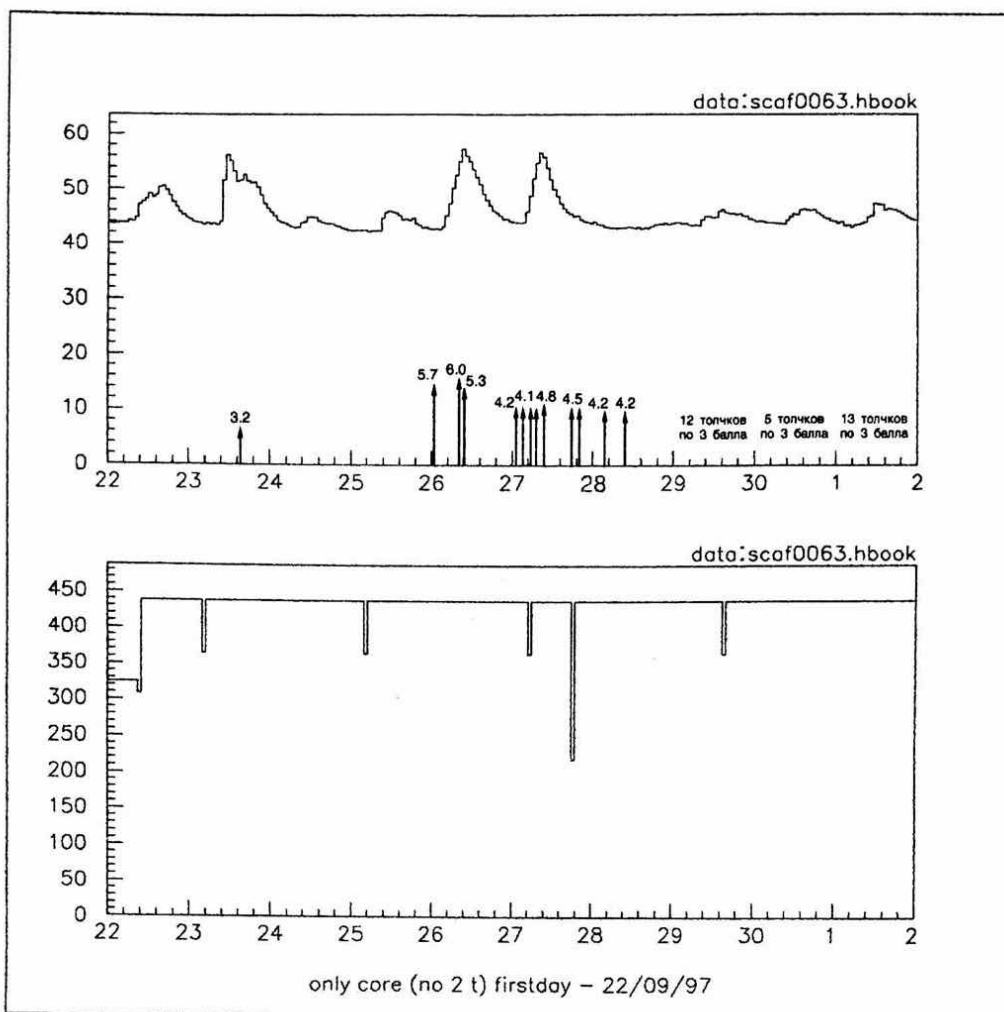


Рис. 18. Данные с установки LVD за 22 сентября- 2 октября 1997 года в связи с землетрясениями.

По оси абсцисс отложена дата;

по оси ординат: на верхнем рисунке – темп счета установки в 1/сек.счетчик;

на нижнем рисунке – количество счетчиков, данные с которых учитывались в суммарном темпе счета за час.

Цифрой над стрелкой обозначена магнитуда толчка.

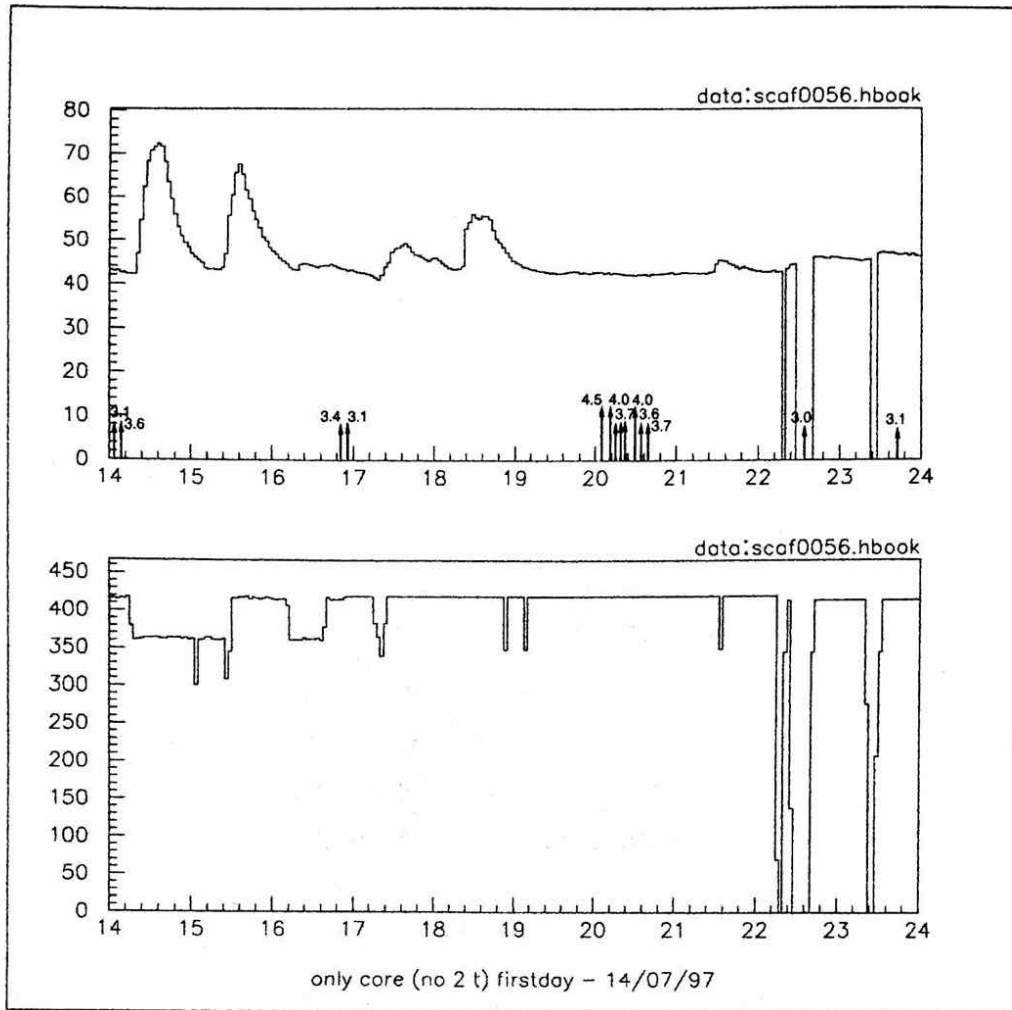


Рис. 19. Данные с установки LVD за 14 – 24 июля 1997 года в связи с землетрясениями.

По оси абсцисс отложена дата;

по оси ординат: на верхнем рисунке – темп счета установки в 1/сек.счетчик;

на нижнем рисунке – количество счетчиков, данные с которых учитывались в суммарном темпе счета за час.

Цифрой над стрелкой обозначена магнитуда толчка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Сформулируем основные результаты, полученные в данной работе.

1. Разработана программа, позволяющая унифицировать данные с установок LVD и LSD и представить их в наглядном виде.
2. Выработаны критерии выделения радоновых выбросов, разработана соответствующая программа и произведен компьютерный отбор событий по данным 1997 года. Из данных LVD выделено 144 пика, из данных LSD – 158 пиков.
3. Проанализирована форма усредненного радонового пика для обеих установок. Характер спада объяснен вентиляцией помещений, в которых расположены установки.
4. Проведен временной анализ радоновых событий. Характеристики LVD и LSD-распределений временных интервалов между событиями указывают на коррелированный характер LVD и LSD-последовательностей выделяемых событий.
5. Обнаружен источник фоновых радоновых событий, связанный с технической деятельностью людей в подземных помещениях: нарушение изолированности атмосферы помещений, в которых находятся установки, перерывы в работе вентиляции.
6. Отмечено существование связи между радоновыми выбросами и землетрясениями.

В заключение считаю своим приятным долгом поблагодарить научного руководителя кандидата физико-математических наук Мальгина Алексея Семеновича за предложенную тему, постоянный интерес к работе и полезные обсуждения, доктора физико-математических наук Рязскую Ольгу Георгиевну за полезные советы и интерес к работе, а также всех сотрудников ЭМДН, участвующих в создании установок LVD и LSD.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. "Элементы сейсмологии и сейсмометрии", М.: Гостехиздат, 1955.
2. Курскеев А. К. "Проблемы прогнозирования землетрясений", Алма-Ата: Наука, 1990.
3. Киссин И. Г. "Землетрясения и подземные воды", М.: Наука, 1982.
4. Сидорин А. Я. "Предвестники землетрясений", М.: Наука, 1992.
5. 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.
6. Зубков С. И. "Времена возникновения предвестников землетрясений", Известия АН СССР, Физика Земли, 1987, № 5, с.87 – 91.
7. V. L. Dadykin et al. Proceedings of the Second International Symposium "Underground Physics 87", Baksan Valley, USSR, 1987, p.94.
8. М. Алиетта и др. Известия РАН, сер. Физическая, 1993, т. 57, с.127.