



10
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

**Б.А. Баклаков, П.К. Лебедев, В.В. Пархомчук,
А.А. Серый, А.И. Слепцов, В.Д. Шильцев**

**ИЗУЧЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ
И МОЩНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОЛЕБАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
В РАЙОНЕ КОМПЛЕКСА УНК**

ПРЕПРИНТ 91-15



НОВОСИБИРСК

Изучение корреляционных
и мощностных характеристик
колебаний земной поверхности
в районе комплекса УНК

Б. А. Баклаков, П. К. Лебедев, В. В. Пархомчук,
А. А. Серый, А. У. Слепцов, В. Д. Шильцев

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе приводятся результаты изучения сейсмических шумов в районе предполагаемого сооружения комплекса ВЛЭПП. Представлены результаты измерений корреляций и спектров мощности в тоннеле УНК и на поверхности земли. Исследованы факторы, дающие наибольший вклад в амплитуду колебаний земной поверхности. Обнаружено определяющее влияние атмосферного давления на низкочастотные движения земной поверхности. Результаты, приведенные в работе, необходимы для проектирования линейного электрон-позитронного суперколлайдера ВЛЭПП.

Investigation of Correlation and
Power Characteristics of Earth Surface Motion
in the UNK Complex Region.

B. A. Baklakov, P. K. Lebedev, V. V. Parkhomchuk,
A. A. Seriy, A. I. Sleptsov, V. D. Shiltsev

A B S T R A C T

In this work the results of seismic motion measurements in the Protvino region, where VLEPP and UNK supercolliders will be build, are presented. Measurements of correlations and power spectra were carried out in UNK tunnel and on the Earth surface. Factors that give main contributions to seismic motion had been investigated. Significant influence of atmospheric pressure on low frequency seismic motion was revealed. The results are important for linear supercollider VLEPP design.

Содержание

1. Введение	5
2. Используемая измерительная аппаратура.....	5
2.1 Подземные измерения.....	5
2.2 Измерения на поверхности земли.....	7
3. Результаты измерений корреляций в тоннеле УНК.....	8
4. Измерения спектров и корреляций на поверхности земли....	9
5. Сверхнизкочастотные движения земной поверхности.....	11
6. Влияние атмосферы на движения земной поверхности.....	13
6.1 Модель флуктуаций атмосферного давления.....	13
6.2 Связь флуктуаций давления с колебаниями поверхности.....	14
6.3 Связь колебаний поверхности с относительными смещениями, измеряемыми нитью.....	14
7. Обсуждение.....	15
8. Заключение.....	17
9. Литература.....	18
Приложение 1. Измерение смещений с помощью натянутой нити.	20
Приложение 2. Модифицированный сейсмодатчик СВК-Д.....	20
Приложение 3. Датчики атмосферного давления и температуры.....	21

1. ВВЕДЕНИЕ

На линейных электрон-позитронных коллайдерах для получения высокой светимости необходимы малые поперечные размеры сгустков [1]. Например, для получения светимости порядка $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в проекте ВЛЭПП размеры сгустков в месте встречи составляют $3 \cdot 0.001 \text{ мкм}^2$, а в JLC $0.23 \cdot 0.0014 \text{ мкм}^2$ [2]. Для получения столь малых размеров сгустков требуется высокая точность установки фокусирующих линз ускорителя на ось пучка. Оценки показывают, что для линз системы финальной фокусировки, эта точность составляет около 0.001 мкм , а для линз регулярной части ускорителя около 0.03 мкм .

Предполагается, что в процессе работы ускорителя подстройка положения осей линз будет производиться по измерению положения пучка с помощью системы обратной связи. Для определения характеристик систем подавления вибраций важно знать уровень сейсмозумов, их корреляционные свойства в предполагаемом районе сооружения ускорителя.

Измерения проводились в двух местах. Измерения уровней сейсмозумов и корреляции колебаний в разнесенных точках проводились в тоннеле УНК. Этот тоннель неплохо подходит для измерений, так как ускоритель ВЛЭПП будет расположен рядом, по касательной к кольцу УНК на такой же глубине от поверхности земли ($30 - 50 \text{ м}$). Измерения относительных и абсолютных движений земли, а также исследование влияния внешних факторов (атмосферного давления и пр.) проводились в стендовом здании ФИЯфа.

Эта работа продолжает исследования, начатые авторами в работе [7] и для связности изложения при необходимости повторяет ее текст.

2. ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

2.1. Подземные измерения

Место подземных измерений располагалось в 3 км к северу от действующего ускорителя У-70, в районе 16-го шахтного ствола УНК на глубине 25 метров от поверхности земли. Это место было выбрано как одно из наиболее тихих на строящемся кольце УНК.

С помощью датчиков могли измеряться смещения пола тоннеля УНК в трех направлениях: по вертикали и по горизонтали - вдоль и поперек тоннеля. Датчики при измерениях устанавливались на гладкий бетонный пол тоннеля или на специальную бетонную подставку размером 1·1·0,2 м на полу тоннеля.

Датчиками перемещений служили промышленные сейсмометры СМ-ЗКВ, чувствительным элементом которых является маятник с закрепленной на нем катушкой, помещенной в магнитное поле. Сейсмометры предназначены для измерений в диапазоне от 0,5 до 20 Гц. Для расширения рабочего диапазона частот сейсмометров в область 0,03 - 100 Гц они были дополнены блоками формирования характеристики [3]. Чувствительность сейсмометров определялась с помощью калибровок. Для корреляционных измерений датчики отбирались по близости их фазовых характеристик.

Сигналы с сейсмометров по кабелям, проложенным в вертикальном кабельном вводе в тоннель УНК, передавались на поверхность земли, к домику с регистрирующей аппаратурой, где оцифровывались 12-разрядным АЦП-101SK [4], выполненным в стандарте КАМАК. При измерениях информация с АЦП непрерывно передавалась в КАМАК - память емкостью 128 к слов с помощью программируемого крейт-контроллера К607А с быстродействием 2,5 мкс/слово.

Измерения обычно проводились при двух частотах опроса АЦП: 700 и 80 Гц. Для подавления эффекта наложения частот при измерениях с частотой опроса 80 Гц использовался RC-фильтр с $\tau = 40$ мкс. Длительность записи равнялась примерно 38 с при частоте опроса АЦП равной 700 Гц и 5,5 мин - при 80 Гц. Это позволяло перекрывать весь рабочий диапазон датчиков от 0,03 до 100 Гц.

В корреляционных измерениях одновременная запись информации шла по трем каналам от трех однотипных (например, вертикальных) сейсмодатчиков: один из них постоянно был приклеен цементом к бетонной подставке, а к другим двум подключались дополнительные кабели длиной 40 и 100 метров, что позволяло переносить их вдоль тоннеля. Чаще всего датчики разносились в разные стороны на предельные расстояния. Таким

образом, после одновременного измерения колебаний в трех точках вдоль тоннеля, можно было изучать парные корреляции движений участков тоннеля, расположенных на расстояниях 40, 100 и 140 метров. Схема измерений в тоннеле приведена на рис. 1.

2.2. Измерения на поверхности земли

Наземные измерения проводились в стендовом здании ФИЯФа в железобетонном бункере размером 30·6·4 м, где были расположены четыре массивные металлические платформы длиной по 5 м, стоящие на жестких подставках, предназначенных для размещения секции ускорителя ВЛЭПП.

Для измерений абсолютных перемещений поверхности использовался модифицированный длиннопериодный вертикальный датчик СВК-Д [13]. Период собственных колебаний маятника датчика составлял 14 с, время затухания 240 с. Модификация заключалась в использовании емкостного датчика для измерения положения маятника (см. Приложение 2). Этот сейсмометр позволял измерять колебания на частотах 0,003 - 2 Гц. Сейсмодатчик обычно располагался на платформе.

Для выделения внешних факторов, влияющих на колебания поверхности, использовались датчики, позволяющие измерять атмосферное давление и температуру воздуха (см. Приложение 3).

Кроме этого, имелась возможность измерять относительные смещения платформы, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Измерения проводились с помощью метода натянутой нити. Подробно этот метод изложен в работе [5, 6], а в Приложении 1 приведена основная идея этого метода.

Возможность одновременного измерения как абсолютного, так и относительного движения участков поверхности давало большие возможности для интерпретации экспериментальных данных. Для примера на рис. 2 и рис. 3 показана временная запись сигналов сейсмометра и нити в двух "событиях". Первое событие, по-видимому, является микроземлетрясением магнитудой около 0,5 балла по шкале землетрясений, принятой в СССР в 1952 году [11], т.к. амплитуда ускорения составляла около $0,5 \text{ мм/с}^2$. Из рисунка видно, что в этом случае сигнал

сейсмометра превосходит сигнал нити, то есть возмущение пришло издалека и при абсолютном смещении платформ на 50 мкм их относительное движение составило менее 0.1 мкм. Во втором случае ситуация обратная - и относительное, и абсолютное перемещение платформ составило 2 - 4 мкм, поскольку возмущение, по-видимому, возникло близко к месту измерения, поэтому относительное и абсолютное смещения получились примерно равными.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КОРРЕЛЯЦИЙ В ТОННЕЛЕ УНК

Результаты измерений спектров мощности сейсмозумов приведены в работе [7], поэтому здесь мы остановимся только на корреляционных измерениях.

Качество, используемых в корреляционных измерениях датчиков, иллюстрируется на рис. 4. Видно, что корреляционная функция для датчиков, стоящих вместе, во всем диапазоне частот до 100 Гц близка к единице.

Экспериментальные спектры корреляций вертикальных вибраций на расстояниях 40, 100 и 140 метров изображены на рис. 5. Хорошо видно, что при увеличении расстояния, уменьшается диапазон частот, в котором существует высокая степень корреляции. На рис. 6 изображены спектры корреляции для разных типов волн - продольных и поперечных. Для этих измерений использовались горизонтальные датчики, размещенные на 90 метров. Выбор типа волны определялся расположением сейсмоприемника: для продольных волн маятник датчика колебался вдоль тоннеля, для поперечных - поперек.

На спектрах корреляции сигналов датчиков, размещенных на расстоянии больше 40 метров, хорошо видно уменьшение корреляции в области частот ниже 0.1 Гц. При меньших расстояниях корреляция становится практически равной единице и в этой области.

На рис. 7 приведена автокорреляционная функция для одного из вертикальных датчиков. Видно, что при увеличении запаздывания от 0 до 4 с, функция быстро уменьшается от 1 до 0. Дальнейшее периодическое поведение функции обусловлено тем, что основной вклад в сигнал дают микросейсмь, которые

периодичны. Вторым максимум автокорреляционной функции при задержке около 200 с связан, по-видимому, с тем, что спектр микросейсма состоит из нескольких пиков с высокой добротностью (см. рис. 8, где показан спектр в районе частоты микросейсма). Сплошной линией на рис. 7 показана подгонка

$$k = A e^{-\nu t} \cos(2\pi f t)$$

с параметрами:

$$A = 0.55 ; \quad \nu = 0.027 \text{ с}^{-1} ; \quad f = 0.12 \text{ Гц} .$$

4. ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ И КОРРЕЛЯЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Измерения, проводимые внутри здания из легких металлоконструкций, позволяли одновременно измерять колебания грунта сейсмоматчиком СВК-Д, атмосферное давление и температуру внутри здания и, с помощью натянутой нити, относительные перемещения, расположенных на разных расстояниях стандартных платформ ВЛЭПП, а также записывать результаты в память ЭВМ типа IBM PC/AT через параллельный контроллер крейта КАМАК и интерфейс. Максимальная база, на которой определялись относительные смещения, составляла 16 метров. Обычное время между измерениями 0.48 с, самые длинные серии измерений занимали около 3 суток. Таким образом, исследовался частотный диапазон от 10^{-5} до 1 Гц. Как уже отмечалось выше, нижняя частота достоверной работы сейсмометра СВК-Д с емкостным датчиком из-за тепловых уходов частоты автогенератора была равна 0.003 Гц.

Одновременные корреляционные измерения колебаний атмосферного давления и перемещений поверхности позволили подтвердить определяющее влияние атмосферы на колебания земной поверхности при частотах ниже 0.2 - 0.3 Гц [8, 12].

Такое влияние может иметь как нелокальный так и местный характер. Примером нелокальной связи являются сейсмические вибрации в диапазоне частот 0.06 - 0.25 Гц (т.н. "микросейсм"). В этой частотной области спектр колебаний почти всегда имеет ярко выраженное повышение - широкий пик (см. рис. 18). В среднем центральная частота пика равна 0.14 Гц. Однако спектр мощности может меняться как по частоте

(появление двух или более пиков, смещение пика), так и меняться по амплитуде в диапазоне двух порядков от 0.1 до 10 мкм²/Гц. Этот микросейсм никак не связан с изменениями погоды на территории, где проводились измерения. Однако нами отмечена следующая связь: сильное повышение спектра микросейсма часто предшествует изменению атмосферного давления и температуры через три - пять дней. Сопоставление с метеорологическими сводками указывает на связь микросейсма с волнением воздушных (и, как следствие, водных) масс над ближайшими океанами - Северным Ледовитым и Атлантическим. Сильные микросейсмические колебания (см. рис. 9) наблюдались в ночь с 22 по 23 января 1991 г., когда в районе Мурманска (более 1500 км от Протвино) сильно штормило и высота волн достигала 7 метров. 26 - 28 января над Московской областью прошел "ныряющий циклон", после чего установилась холодная погода (до -30 градусов).

Такая взаимосвязь позволяет объяснить наблюдаемое нами частотно-амплитудное поведение микросейсма: чем ниже частота пика микросейсма, тем больше его амплитуда, и наоборот. Действительно, если над водой дует ветер с характерной скоростью V , то частота возбуждаемых гравитационных волн на поверхности определяется из равенства фазовой скорости волны и скорости воздуха [10]:

$$A = g / (2 \cdot \pi \cdot V), \quad (4.1)$$

где g - ускорение свободного падения. Так, частотам около 0.14 Гц соответствует скорость $V = 11$ м/с. Поскольку большая скорость вызывает волны большей энергии, то, в соответствии с (4.1), большая амплитуда сейсмических волн должна наблюдаться при меньших частотах.

Локальные изменения атмосферного давления и температуры над данной территорией определяют смещения грунта в диапазоне частот ниже 0.1 Гц. На рис. 10 показан приход области повышенного давления, с которым пришло понижение температуры воздуха снаружи и внутри здания. При этом произошло смещение двух платформ ВЛЭПП на 30 мкм относительно друг друга в вертикальном направлении. На рис. 11 хорошо видно, как возросли флуктуации измеряемых величин с приходом фронта давления в

диапазоне частот 0.01 - 1.0 Гц. Наиболее резко поднялась величина колебаний давления - более, чем в 20 раз за один час - это отражает сильные порывы ветра и вьюгу. Одновременно почти на порядок увеличились колебания температуры и относительные колебания платформ. Колебания сейсмометра СВК-Д нарастали более плавно, что указывает на связь абсолютных смещений поверхности с поведением атмосферы на обширной территории. Насколько значительно изменяется спектр мощности колебаний давления, относительных и абсолютных перемещений видно на рис. 12 - 14. При значительном волнении в атмосфере ярко видна корреляция между абсолютными смещениями грунта и колебаниями давления в диапазоне частот 0.03 - 0.2 Гц. На рис. 15 изображена косинусная и синусная части спектра корреляций сигналов сейсмометра СВК-Д и датчика атмосферного давления при измерениях в течении 5 часов днем 11.01.1991 г. Под спектром корреляции двух сигналов $X_1(t)$ и $X_2(t)$ мы подразумеваем величину

$$K(\omega) = \frac{\langle X_1(\omega) X_2^*(\omega) \rangle}{(\langle |X_1(\omega)|^2 \rangle \langle |X_2(\omega)|^2 \rangle)^{1/2}} \quad (4.2)$$

здесь скобки означают усреднение по выборкам. То, что мы называем "косинусной" и "синусной" частью соответствует реальной и мнимой частям выражения (4.2). Смена знака в косинусной части корреляции на частоте 0.07 Гц (см. рис. 15) имеет аппаратное происхождение - связана с изменением фазы на 180 градусов при переходе резонанса маятника сейсмометра СВК-Д.

5. СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Движение поверхности земли имеет как колебательную составляющую, так и случайную диффузию, вызываемую необратимыми изменениями свойств грунта типа скачкообразной разрядки внутренних напряжений. На рис. 3 был показан пример такого события, когда платформы сместились по вертикали на 2 мкм за доли секунд. Случайный характер таких скачков приводит к непрерывной диффузии элементов поверхности. Предполагая, что

вероятность таких скачков пропорциональна расстоянию l между точками измерения времени наблюдения t , можно получить оценку для взаимной дисперсии смещения точек поверхности в виде:

$$\delta x^2 = t \cdot l \cdot A, \quad (5.1)$$

где A - параметр модели.

Таблица 1

Параметры измерений смещений грунта

п.	l (м)	t	x (мкм)	A (мкм ² /с·м)
1	7 (в)	15 час	6	$0.9 \cdot 10^{-4}$
2	7 (г)	15 час	13	$1.4 \cdot 10^{-4}$
3	1 (в)	8 час	2	$1.4 \cdot 10^{-4}$
4	1 (г)	8 час	3	$3.0 \cdot 10^{-4}$
5	1 (в)	66 час	6	$1.5 \cdot 10^{-4}$
6	1 (г)	66 час	4	$0.6 \cdot 10^{-4}$
7	100 (в)	2 год	700	$0.8 \cdot 10^{-4}$
8	300 (в)	2 год	1400	$1.0 \cdot 10^{-4}$
9	600 (в)	2 год	1800	$0.9 \cdot 10^{-4}$

В таблице 1 приведены результаты измерений смещений грунта с помощью нити (п. 1 - п. 6) и результаты точного нивелирования трассы в районе УНК (п. 7 - п. 9). Буквами (в) и (г) обозначены вертикальные и горизонтальные движения. Как видно из таблицы результаты подгонки под модель (5.1) довольно хорошие при параметре $A = 10^{-4}$ мкм²/с·м.

Измерения смещения тоннеля линейного ускорителя SLAC в течении 17 лет [8, 9] показали максимальное смещение по вертикали и горизонтали равное соответственно 15 и 7.5 мм, что дает оценку параметра A : $A = 0.4 - 1.4 \cdot 10^{-4}$ мкм²/с·м. Хорошее соответствие этих данных полученных в совершенно разных местах указывает на общий характер движения поверхности земли.

Используем полученные данные для оценки ожидаемого смещения центра тоннеля ВЛЭПП длиной 20 км за конкретное время (таблица 2).

Таблица 2

Ожидаемые смещения тоннеля ВЛЭПП

время	смещение
1 с	1.4 мкм
1 мин	11 мкм
1 час	84 мкм
1 день	415 мкм
1 мес.	2.3 мм
1 год	7.7 мм
10 лет	24 мм

Приведенные в таблице 2 смещения определяют величины средне-квадратичного отклонения и предъявляют соответствующие требования на системы автоподстройки положения элементов ускорителя.

6. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ДВИЖЕНИЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

6.1. Модель флуктуаций атмосферного давления

Движение воздуха в атмосфере характеризуется высокими числами Рейнольдса (как легко оценить, они составляют 10^6 и более) и имеет турбулентный характер. Для развитой турбулентности справедлив закон Колмогорова - Обухова (см., например, [10]), устанавливающий связь между флуктуациями скорости основного потока V на размерах λ :

$$V \approx U (\lambda/L)^{1/3}, \quad (6.1)$$

здесь U , L - скорость и характерный размер основного течения (в нашем случае они примерно равны средней скорости ветра и высоте атмосферы). Каждому размеру λ соответствует частота флуктуаций в заданной точке измерения:

$$f \approx U/\lambda, \quad (6.2)$$

$$V_\lambda = V_f \approx U^{4/3} (f \cdot L)^{-1/3}.$$

Отсюда имеем оценку флуктуаций давления:

$$P_f \approx \rho \cdot V_f^2 / 2 = \rho \cdot U^{8/3} (f \cdot L)^{-2/3} / 2$$

(ρ - плотность воздуха) и спектра мощности $S(P)_f$:

$$S(P)_f \approx \frac{P_f^2}{f} = \rho^2 \cdot U^{16/3} \cdot L^{-4/3} \cdot f^{-7/3} / 4. \quad (6.3)$$

На рис. 16 приведено сравнение измеренного спектра мощности давления и построенного по формуле (6.3). В качестве L взята величина порядка высоты атмосферы $L = 5000$ м, а для средней скорости $U = 3$ м/с. Видно, что модель хорошо описывает реальные флуктуации атмосферного давления.

6.2. Связь флуктуаций давления с колебаниями поверхности

Если считать грунт упругим однородным изотропным полупространством, характеризуемым модулем юнга E_f (в общем случае зависящим от частоты), то можно оценить абсолютное смещение поверхности X_f под действием силы атмосферного давления:

$$X_f \approx P_f \cdot \lambda / E_f = P_f \cdot U / (E_f \cdot f), \quad (6.4)$$

где λ - характерный размер области флуктуации давления, введенный выше. Отсюда спектр мощности абсолютных колебаний поверхности $S(X)$:

$$S(X) \approx \rho^2 \cdot U^{22/3} \cdot E_f^{-2} \cdot L^{-4/3} \cdot f^{-13/3}. \quad (6.5)$$

Результаты моделирования спектров с параметрами $U = 3$ м/с и $L = 5000$ м, $E_f = 10^8$ н/м² (модуль Юнга для твердой глины [11]) приведены на рис. 16. Видно неплохое согласие модельных представлений с измеренными спектрами.

6.3. Связь колебаний поверхности с относительными смещениями, измеряемыми нитью

Измерение сейсмодатчиком СВК-Д абсолютных колебаний поверхности производились вплоть до частоты 0.003 Гц. Измерения нитью относительных смещений платформ охватывали диапазон 0 - 1 Гц. Пользуясь вышеизложенным модельным представлением колебаний поверхности можно определить спектр смещений платформ друг относительно друга.

Поскольку емкостной датчик смещения нити расположен посередине, то при длине нити 2Δ вклад давления в смещения поверхности δX , измеряемые нитью, будет равен:

$$\delta X \approx X \frac{\Delta^2}{2 \cdot \lambda^2} = X \frac{\Delta^2 \cdot f^2}{2U^2} \quad (6.6)$$

и, следовательно, спектр смещений $S(\delta X)_f$:

$$S(\delta X)_f \approx \rho^2 U^{10/3} E_f^{-2} L^{-4/3} f^{-1/3} \frac{\Delta^4}{4}. \quad (6.7)$$

Для того, чтобы исключить из рассмотрения неизвестный точно параметр E_f , входящий в (6.7), из соотношений экспериментально измеренных спектров $S(X)_f$ и $S(\delta X)_f$ определялась длина корреляции D :

$$D_f = \Delta (2(S(X)_f / S(\delta X)_f)^{1/2}), \quad (6.8)$$

представленная на рис. 17. Видно, что в диапазоне частот ниже 0.1 Гц

$$D_f \approx \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (6.9)$$

с параметром $c = 10$ м/с, что хорошо согласуется с модельным представлением (6.2).

7. ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке рис. 18 изображен спектр мощности вибраций поверхности земли в диапазоне от 0.003 до 100 Гц, измеренных в районе комплекса УНК.

Этот спектр может быть разделен по частотам на три составные части, в каждую из которых преобладающий вклад вносит свой источник. Это - низкочастотная область ($f < 0.1$ Гц), где основным источником движений является атмосферное давление, область микросейсма ($f \approx 0.14$ Гц), обусловленная взаимодействием атмосферы и океана, и область техногенных шумов ($f = 0.5 - 100$ Гц). Кратко охарактеризуем эти три области.

Характерной особенностью изучаемых сейсмозумов является наличие микросейсмической составляющей, которая проявляется в спектре мощности в виде пика на частоте около 0.14 Гц (см. рис. 18). Происхождение микросейсма обусловлено взаимодействием водных масс в мировом океане с атмосферой. Частоту микросейсмического пика, по-видимому, можно опре-

делить из равенства средней скорости ветра и фазовой скорости гравитационных волн на поверхности океана (4.1). Из рис. 8 видно, что этот пик состоит из нескольких высокочастотных пиков, обусловленных, по-видимому, вкладами от различных участков океана.

Таким образом, микросейсм является порождением очень удаленного (несколько тысяч километров) и мощного источника (величина его в некотором диапазоне частот вокруг 0.14 Гц в месте измерения во много раз превосходит амплитуду шумов местных источников). Из этого следует, что, если мы наблюдаем сигналы с двух датчиков, расположенных на некотором расстоянии, то в некотором диапазоне частот около микросейсмического пика корреляция равна единице с учетом временной задержки прихода волн на датчики, что хорошо видно из рис. 5. Видно, также, что область единичной корреляции растянута от частоты микросейсма в основном вправо, поскольку вклад в спектр от остальных источников падает с увеличением частоты. Корреляционная длина микросейсма (рис. 17), определенная через отношение спектров, занижена более чем на два порядка. Это связано с тем, что нить, измеряющая относительные перемещения платформы, "не видит" микросейсма. Иначе говоря, на частоте микросейсма абсолютные и относительные движения обусловлены разными факторами: абсолютные - микросейсмом; относительные - локальными источниками. То есть корреляционная длина из рис. 17 для микросейсма является оценкой снизу.

В низкочастотной области $f < 0.1$ Гц, как показали измерения, основной вклад в спектр колебаний поверхности дают флуктуации атмосферного давления, описываемые законом Колмогорова - Обухова. Спектр давления растет с уменьшением частоты. По-видимому, спектр прекращает расти после частоты $3 \cdot 10^{-7}$ Гц (один месяц), когда флуктуации давления, определенные из спектра, сравниваются с максимальными флуктуациями давления, равными примерно 10 мм.рт.ст. Длина корреляции (рис. 17) в этой области приблизительно равна 10 м/с/ω (6.9), где скорость, очевидно, близка к средней скорости ветра.

В области 0.5 - 100 Гц величина спектра определяется в основном техногенной активностью вблизи места измерения.

Спектр в области 0.5 - 100 Гц на рис. 18 был снят в тоннеле в тихое время, и в рабочий день спектр мощности на этих частотах возрастал на один-полтора порядка [7]. Среднеквадратичное смещение на частотах больше 10 Гц в тихих условиях составляет $0.4 - 0.8 \cdot 10^{-3}$ мкм.

В модели упругого полупространства с независимым от частоты модулем Юнга E_f , используемой для описания грунта, при уменьшении частоты размер возмущения возрастает, что приводит, согласно (6.4) к возрастанию смещений. Однако, если представить грунт как жидкость, то перемещения определяются только плотностью и давлением и не зависят от размера $X = P_f / (\rho g)$. Кроме того, с увеличением длины в движение включаются все более глубокие слои, поэтому модуль Юнга может изменяться, и обстоятельства ограничивают применимость модели упругого полупространства в области низких частот. Если модуль Юнга принять равным 10^8 н/м², то характерный размер, при котором $\lambda/E = 1/(\rho g)$ составляет 3 км, что соответствует частотам ниже 10^{-3} Гц. В такой модели флуктуации атмосферного давления 10 мм.рт.ст. приводят к перемещениям $X = \Delta P / (\rho g) = 4$ см.

На рис. 19 показан спектр мощности колебаний поверхности в диапазоне частот $3 \cdot 10^{-3} - 10^2$ Гц. Пунктиром для сравнения приведены спектры в шумных и тихих условиях из работы [8]. Видно, что в низкочастотной области колебания в районе УНК значительно выше, однако такое превышение низкочастотных колебаний в Подмоскowie отмечалось и ранее [12].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя итоги этой работы и работы [7], можно сказать, что:

1. Резко падающий по частоте спектр колебаний позволяет при отсутствии мощных источников техногенных шумов пренебречь колебаниями с частотой более 10 Гц, амплитуда смещений которых не превышает 10^{-3} мкм.

Вклад в дисперсию положения пучка в финальном фокусе определяется амплитудой высокочастотных колебаний ускорителя

$$\Delta x_f^2 = \Delta x_0^2 \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i}{\gamma_f} \frac{\beta_f}{\beta_i} \approx \Delta x_0^2 N \frac{1}{2} \frac{\beta_f}{\beta_i}$$

где $\gamma_i = E/mc^2$ - относительная энергия в месте расположения линзы с номером i , β_i - значение β -функции в этом месте, β_f - значение в финальном фокусе. Для $\beta_i = 5$ м, $\beta_f = 1$ мм, $N = 10^4$, вклад в флуктуацию положения составит 10^{-3} мкм.

2. Движения в диапазоне частот от 0.1 до 1.0 Гц могут составлять величину порядка 1 мкм, а в диапазоне 1 - 10 Гц до 10^{-2} мкм. Эти движения предъявляют требования на точность и скорость отработки систем обратных связей. Хорошая корреляция в этом случае заметно облегчает выполнение этих требований.

3. Медленные движения с частотами ниже 0.1 Гц определяют необходимый диапазон систем коррекций элементов ускорителя. За время порядка часа возможен уход элементов до 80 мкм, за год до 7 мм. Видно, что диапазон автоматического регулирования должен составлять несколько миллиметров с точностью до нескольких микрон для попадания в диапазон работы быстрой системы подстройки.

4. Ясно, что при сооружении комплекса следует предусмотреть меры по уменьшению техногенных возбуждений на работающий ускоритель. Для этого желательно все источники вибраций: автомобильные дороги, компрессоры, вентиляционное оборудование - располагать на достаточном удалении от трассы ВЛЭПП, либо научиться демпфировать возбуждаемые ими колебания в месте возникновения.

В заключение авторы выражают благодарность В.Е. Балакину за внимание к работе и полезные обсуждения, В.А. Токмакову и Н.Л. Трапезникову за помощь на начальной стадии измерений, А.И. Бажану, К.Б. Жихареву, В.М. Журавлеву, В.М. Молявину, А.С. Павлову, Р.А. Сивцову, Н.Р. Саксу, А.В. Чаюкову, А.В. Чернышову за помощь при подготовке и проведении измерений.

7. ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В.Е., Будкер Г.И., Скринский А.Н. О возможности

- создания установки со встречными электрон-позитронными пучками на сверхвысокие энергии. Проблемы физ. выс. энергий и управляемого синтеза. Новосибирск, 1978., Труды 6-го Всесоюз. совещ. по ускор. заряженных частиц, Дубна, 11 - 13 окт., 1978 г. - Дубна, 1979., с.27 - 36.
2. Proceedings Intern. Workshop on Next Generation Linear Colliders, Stanford, California, 1977; SLAC-Report-335, 1988; KEK, Tsukuba, Japan, 1990; KEK Internal 90 - 22, August 1990.
 3. Трапезников Н.Л. В сб. Сейсмические приборы. - М.: Наука, вып.10, 1977.
 4. Блоки в стандарте КАМАК. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 1983.
 5. Пархомчук В.В., Шильцев В.Д. Высокочувствительный датчик положения для выставки элементов комплекса ВЛЭПП ФИЯФ-РМ89-02, 1989.
 6. Baklakov V.A. et.al. Mechanical Stability of VLEPP Tables, VLEPP-Note-02/1990 and II Int. Workshop on Next Generation Linear Colliders, KEK, Japan, 1990.
 7. Баклаков В.А., Лебедев П.К., Пархомчук В.В., Токмаков В.А., Трапезников Н.Л., Серый А.А., Шильцев В.Д. Измерения уровня вибраций в тоннеле УНК. - Препринт ИЯФ СО АН СССР 90-88, Новосибирск, 1990.
 8. Fischer G.E. Ground motion and its effects in accelerator design, Stanford, 1985; SLAC-PUB-3392 Rev., July, 1985.
 9. Fischer G.E. Mayound M. Some thoughts on Linear Collider Alignment and Mechanical Stability, CERN-LEP-RF-SU-88-07, CLIC Note 61, 1988.
 10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Москва, 1986.
 11. Таблицы физических величин. Под ред. Кикоина И.К. М.: Атомиздат, 1976 г.
 12. Старовойт О.Е., Чернобай И.П. Спектр помех ЦСО Обнинск в диапазоне периодов 5 - 300 с. Сейсмические приборы, вып. II, М.:Наука, 1978, с 149-156.
 13. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР, сб. под ред. Арановича З.И., с.43 - 63, Наука, 1974.

Приложение 1

Измерение смещений с помощью натянутой нити

В стендовом здании ФИЯФ внутри железобетонного бункера размером $30 \cdot 6 \cdot 4$ м³ располагались четыре массивные металлические платформы, каждая длиной 5 м. На краях платформ закреплялась нить с постоянным натяжением 1.4 Н. Использовалась позолоченная вольфрамовая проволока диаметром 28 мкм и длиной от 2 до 14 м. В середине нити устанавливался датчик смещения. Чувствительность датчика 10 мВ/мкм. Временной уход 0.07 мкм за 10 минут в вертикальном направлении и в три раза меньше в горизонтальном направлении. Вероятно, что временной уход связан с температурным расширением опоры датчика. Показания датчика измерялись интегрирующим АЦП ЦО609 с точностью 1.0 мкВ (10^{-4} мкм) и временем интегрирования 320 мс.

Смещения измерялись следующим образом. На нить подавали переменное напряжение 25 В частотой 100 кГц. Датчик имел две пары пластин $10 \cdot 20$ мм и 5 мм зазор между пластинами. Одна пара устанавливалась горизонтально, другая вертикально. С помощью микрометрических винтов пластины устанавливались таким образом, чтобы нить находилась в середине между пластинами (точнее, чтобы емкость между нитью и каждой пластиной была одинакова).

Сигналы с пары пластин поступали на входы дифференциального усилителя с $K_{\text{синф}} = -60$ дБ, $K_{\text{дифф}} = +20$ дБ. Переменное напряжение с усилителя перемножалось с напряжением нити. Сигнал с перемножителя поступал на фильтр НЧ с полосой 400 Гц. Низкочастотный сигнал, пропорциональный смещению нити относительно пластин подавался на АЦП.

Приложение 2

Модифицированный сейсмодатчик СВК-Д

Для измерения вертикальных колебаний использовался модифицированный сейсмометр СВК-Д [13], позволяющий измерять сейсмические волны с периодом 0.5 - 50 с. Период собственных колебаний маятника сейсмометра 14 с время затухания 240 с. В конструкции датчика предусмотрена компенсация барометрического эффекта - всплывания маятника при изменении атмосферного давления. Модификация заключалась в использовании емкост-

ного датчика для измерения положения маятника. Для этого в корпусе прибора на расстоянии около 1 мм от рабочего маятника располагалась металлическая пластина размером около $3 \cdot 3$ см². Емкость, образованная пластиной и маятником была включена в резонансный контур автогенератора с частотой около 4.3 МГц. При движении маятника изменение емкости приводит к изменению частоты генерации. Чувствительность датчика составила 0.2 кГц/мкм. Частота измерялась частотомером ЧЗ-63/1 с временем измерения 100 мс и точностью $2 \cdot 10^{-6}$. Частотомер был подключен к КАМАК-крейту через входной регистр.

При измерении сейсмометром колебаний с частотами, малыми по сравнению с собственной частотой колебаний маятника f_0 , сигнал сейсмометра пропорционален квадрату частоты колебаний $X_{\text{svkd}} = Xf^2/f_0^2$, то есть чувствительность сейсмометра на малых частотах мала. Поэтому при наличии собственных шумов измерительной схемы, спектр которых растет с уменьшением частоты, нижняя граница рабочего диапазона частот определяется превышением шума над сигналом. В нашем случае соотношение сигнал/шум равнялось 1 при частоте 0.003 Гц и резко падало при увеличении частоты. На частотах ниже 0.003 Гц уходы частоты явно связаны с температурой. Собственный уход автогенератора составлял около 350 Гц/градус.

Приложение 3

Датчики атмосферного давления и температуры

Давление измерялось датчиком с мембраной, имеющей емкостную связь с автогенератором на 70 МГц. Мембрана разделяла корпус датчика на два объема. Один объем связан с атмосферой, другой - герметичный. Мембрана, изготовленная из металлизированного лавсана, и металлическая пластина, расположенная вблизи мембраны, образовывали две обкладки конденсатора, включенного в резонансный контур автогенератора. При изменении внешнего давления прогиб мембраны приводил к изменению частоты генерации. Чувствительность датчика 70 кГц/мм рт. ст. Калибровка датчика производилась поднятием его вверх на один метр. Тепловой уход 6 кГц/град. Частота изме-

рялась частотомером ЧЗ-63/1 с временем измерения 100 мс и точностью $2 \cdot 10^{-6}$. Частотомер был подключен к КАМАК-крейту через входной регистр.

Температура измерялась АЦП Ц0609 с датчика на терморезисторе типа ММТ-1. Чувствительность датчика 100 мВ/град., стабильность $2 \cdot 10^{-4}$, при времени измерения 320 мс один квант АЦП соответствовал $1.5 \cdot 10^{-4}$ град.

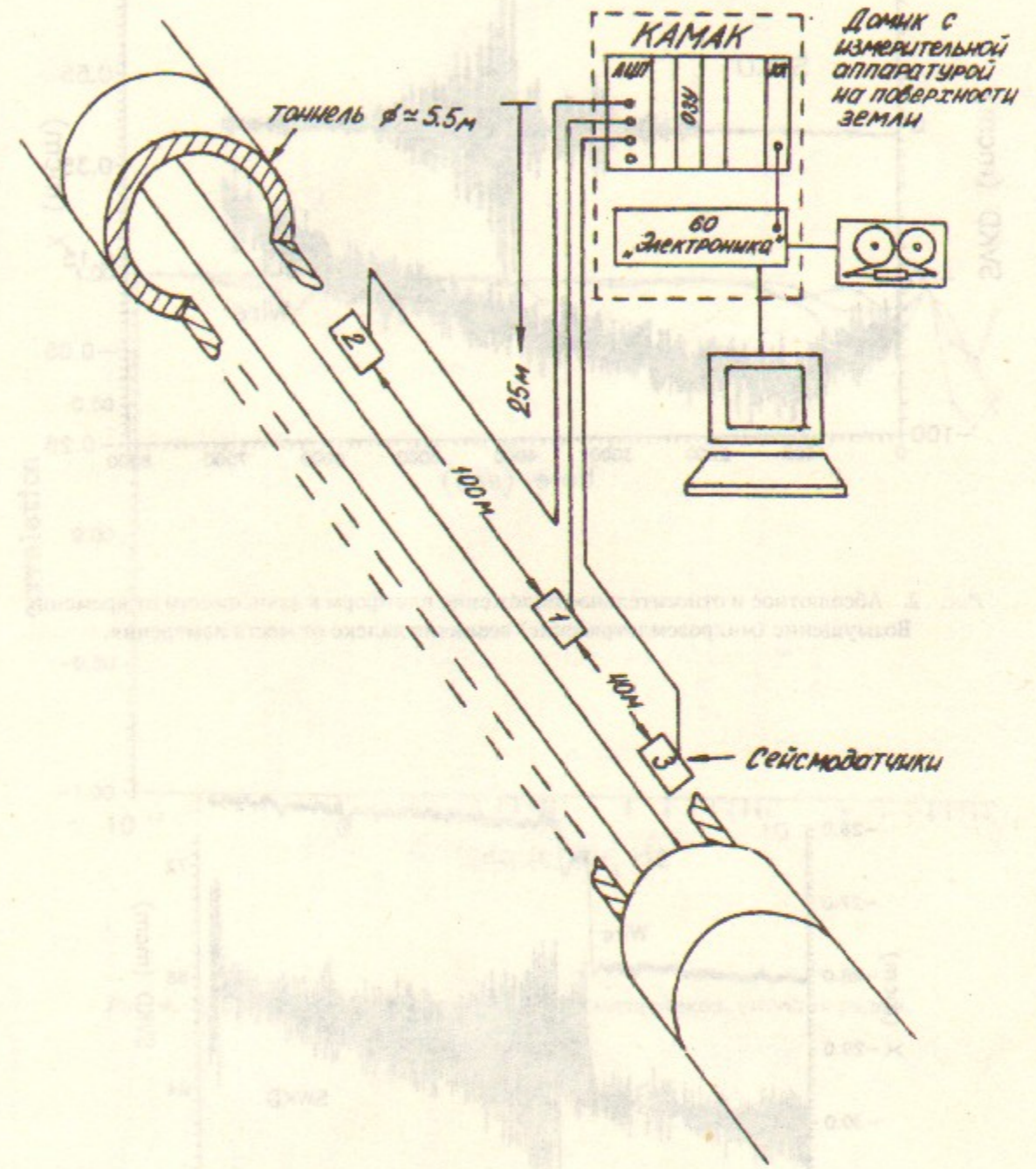


Рис. 1. Схема измерений в тоннеле УНК.

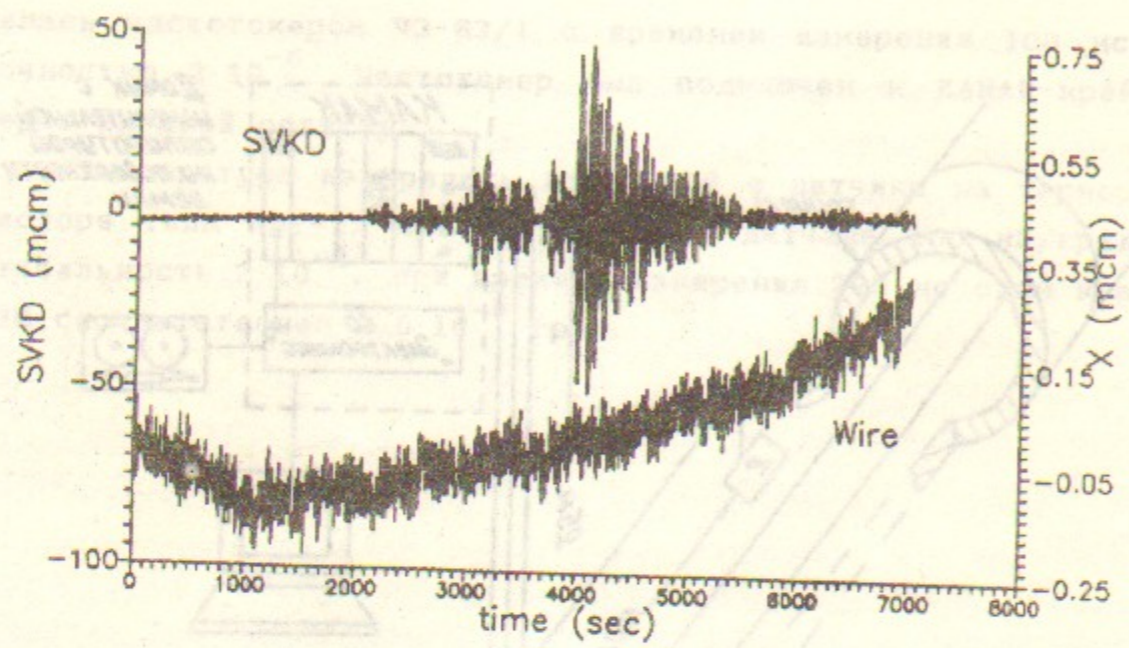


Рис. 2. Абсолютное и относительное положение платформ в зависимости от времени. Возмущение (микроземлетрясение) возникло далеко от места измерения.

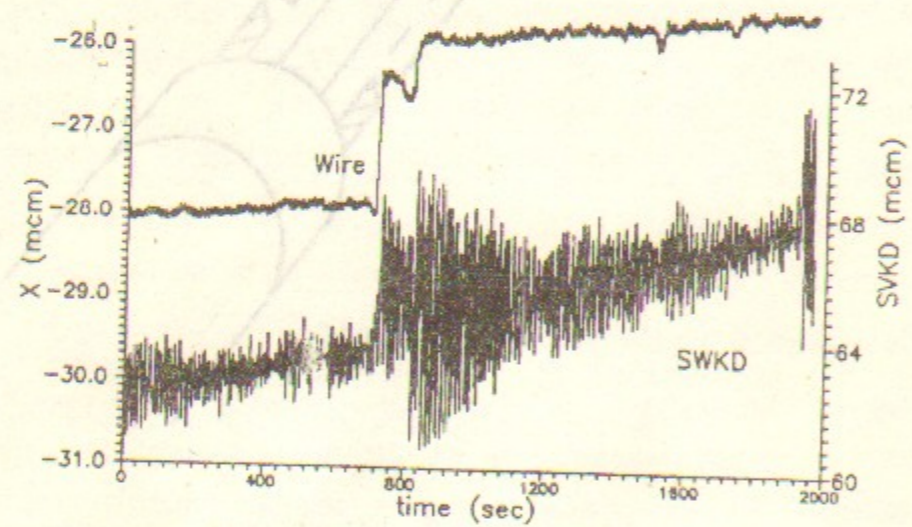


Рис. 3. Абсолютное и относительное положение платформ в зависимости от времени. Возмущение возникло вблизи от места измерения.

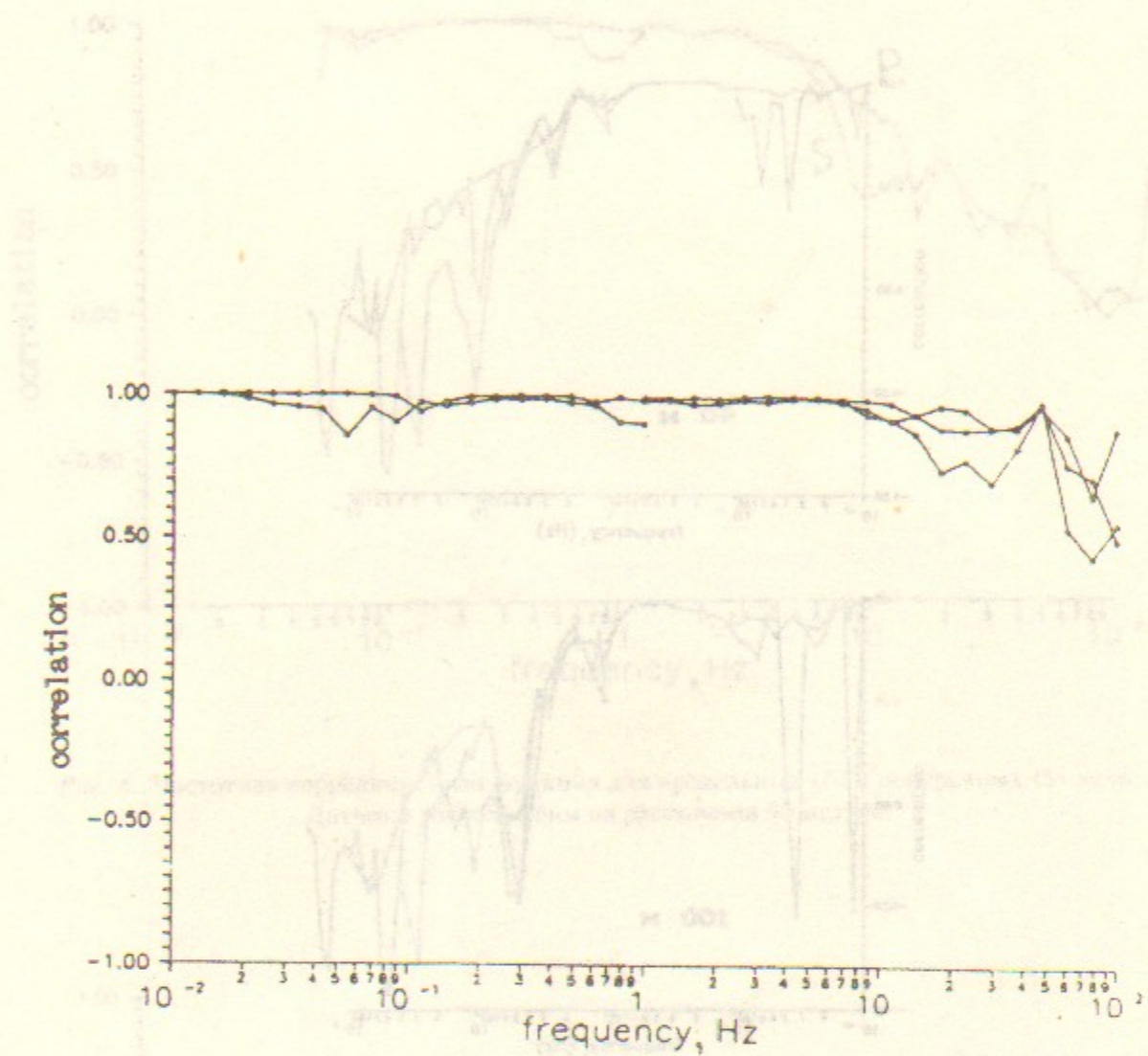


Рис. 4. Корреляционная функция двух сейсмодатчиков, стоящих рядом.

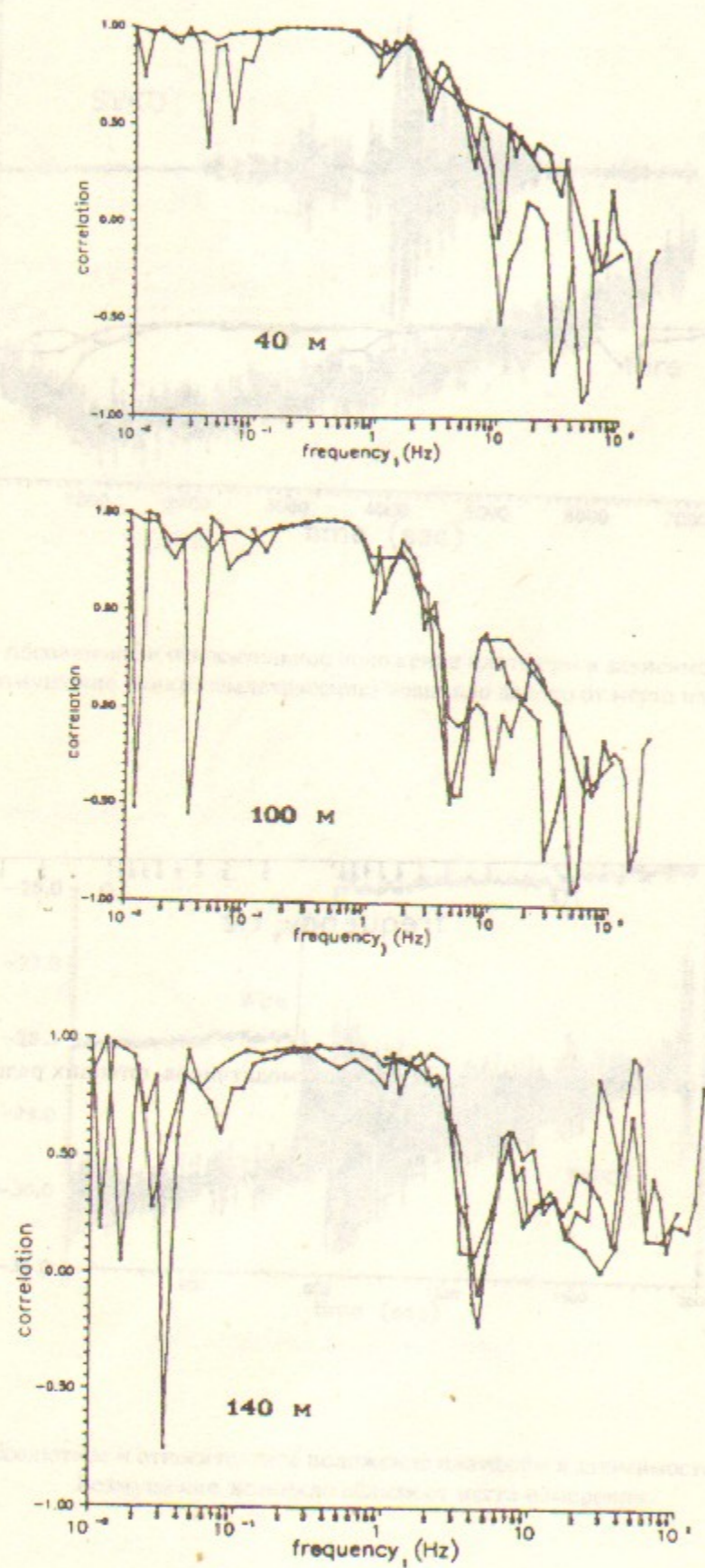


Рис. 5. Частотная корреляционная функция для вертикальных датчиков с расстояниями между ними 40, 100 и 140 м.

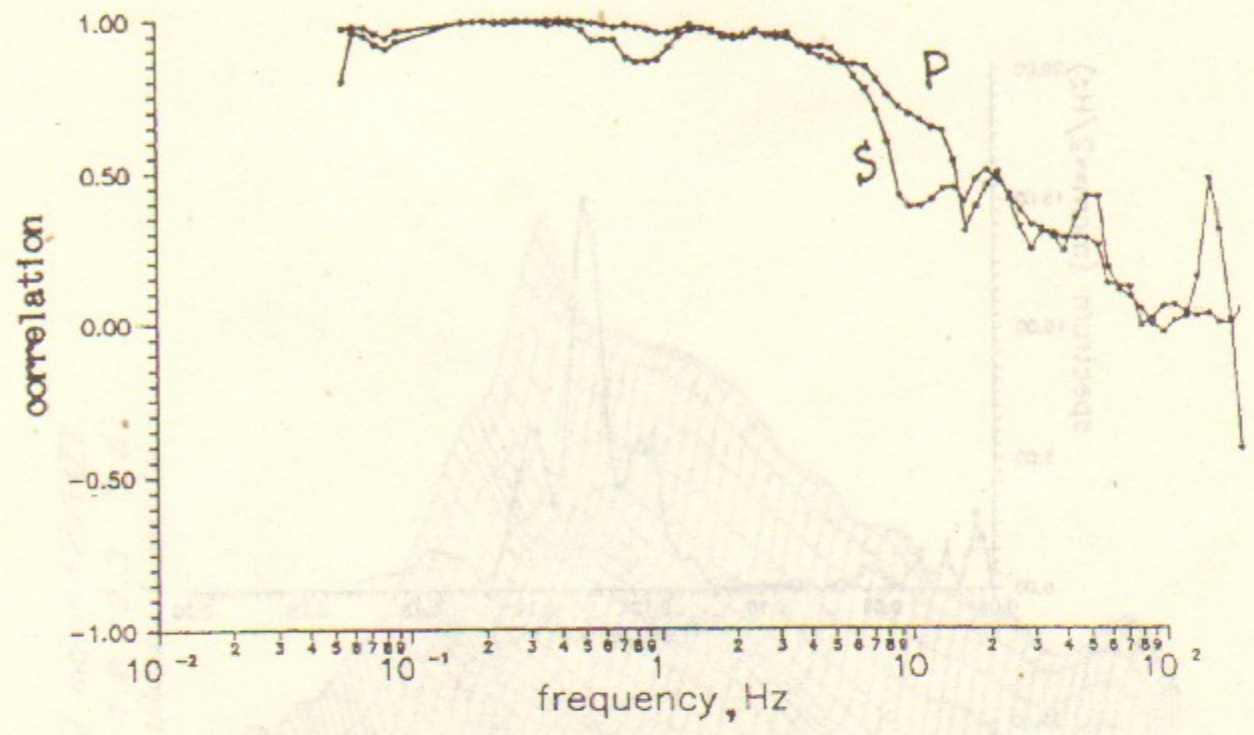


Рис. 6. Частотная корреляционная функция для продольных (P) и поперечных (S) волн. Датчики расположены на расстоянии 90 метров.

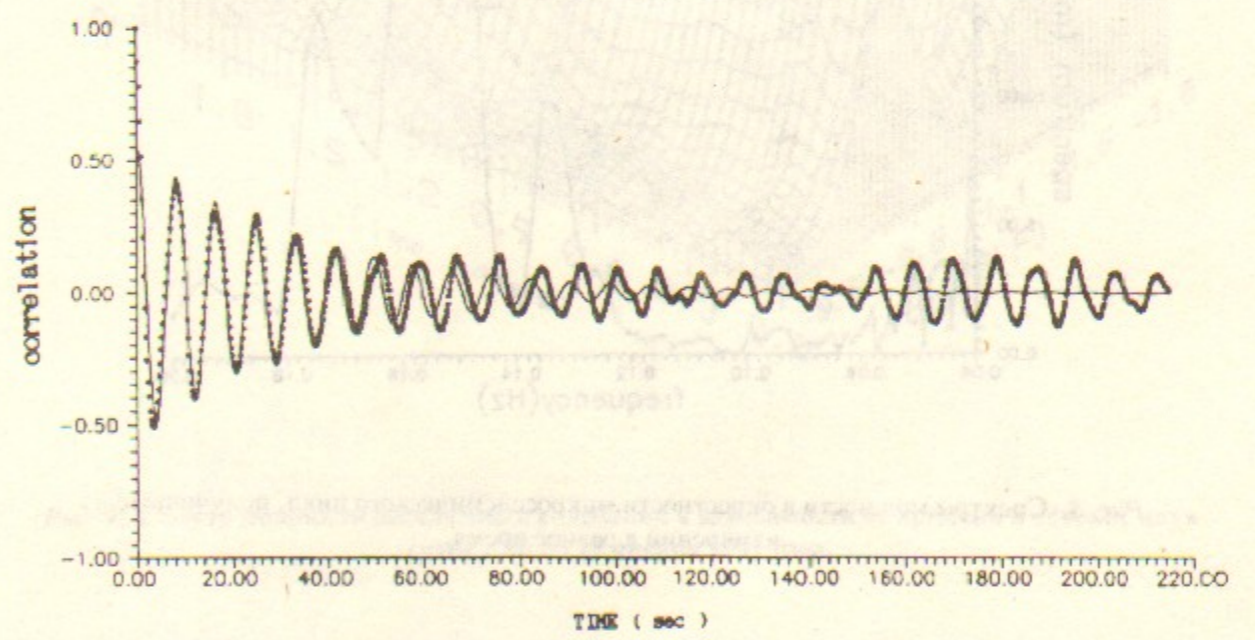


Рис. 7. Автокорреляционная функция вертикальных колебаний в тоннеле: точки — наши измерения; сплошная линия проведена по формуле в тексте.

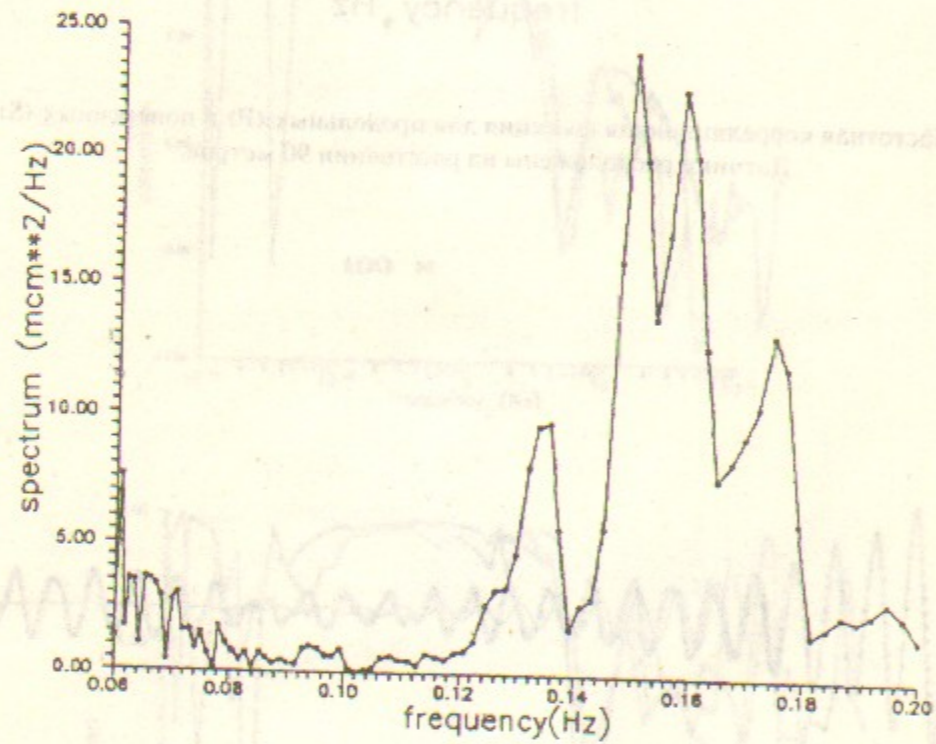
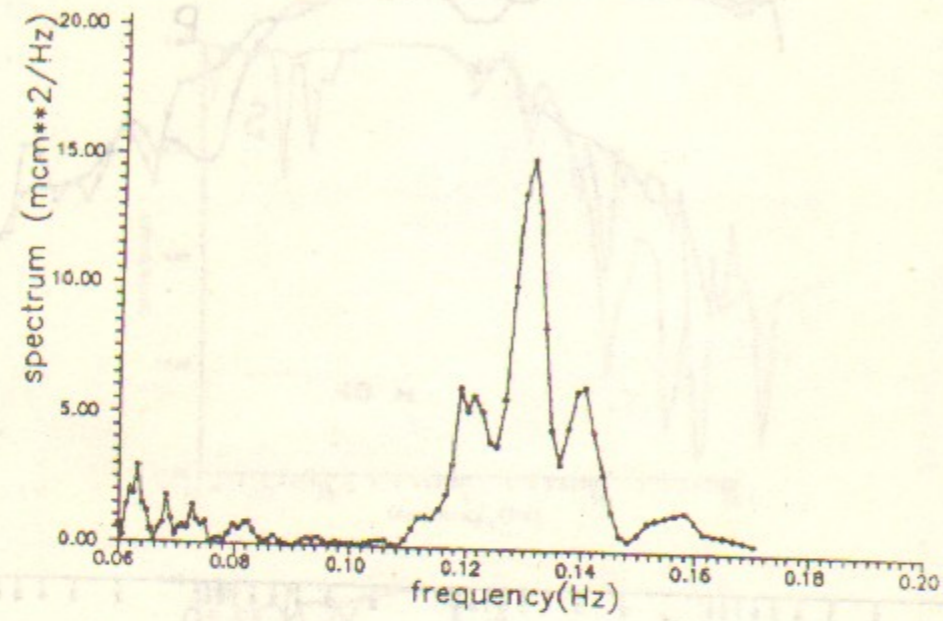


Рис. 8. Спектры мощности в окрестности микросейсмического пика, полученные из измерений в разное время.

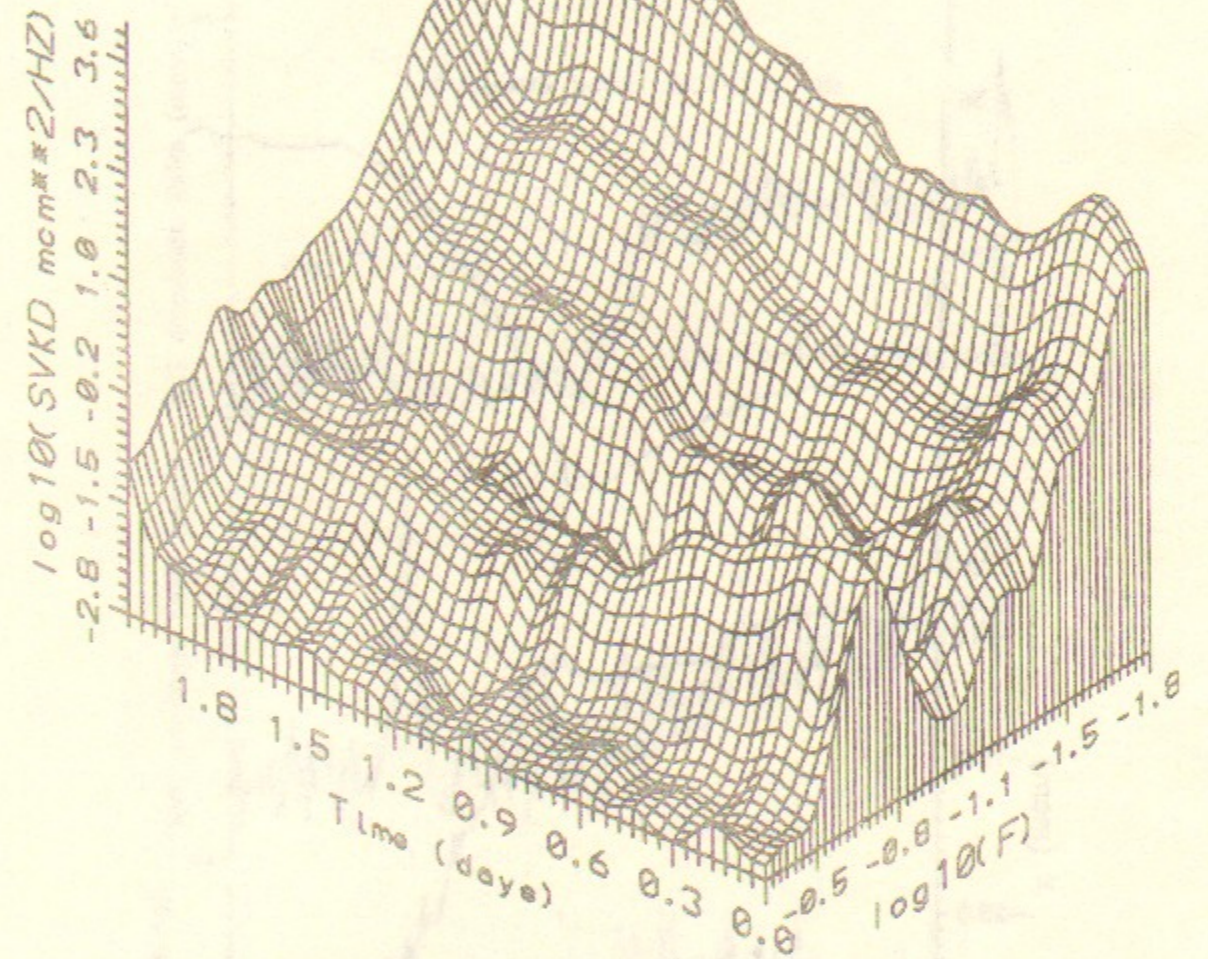


Рис. 9. Спектр мощности абсолютных колебаний в зависимости от времени в течение двух суток с 26 по 28 января 1991 года.

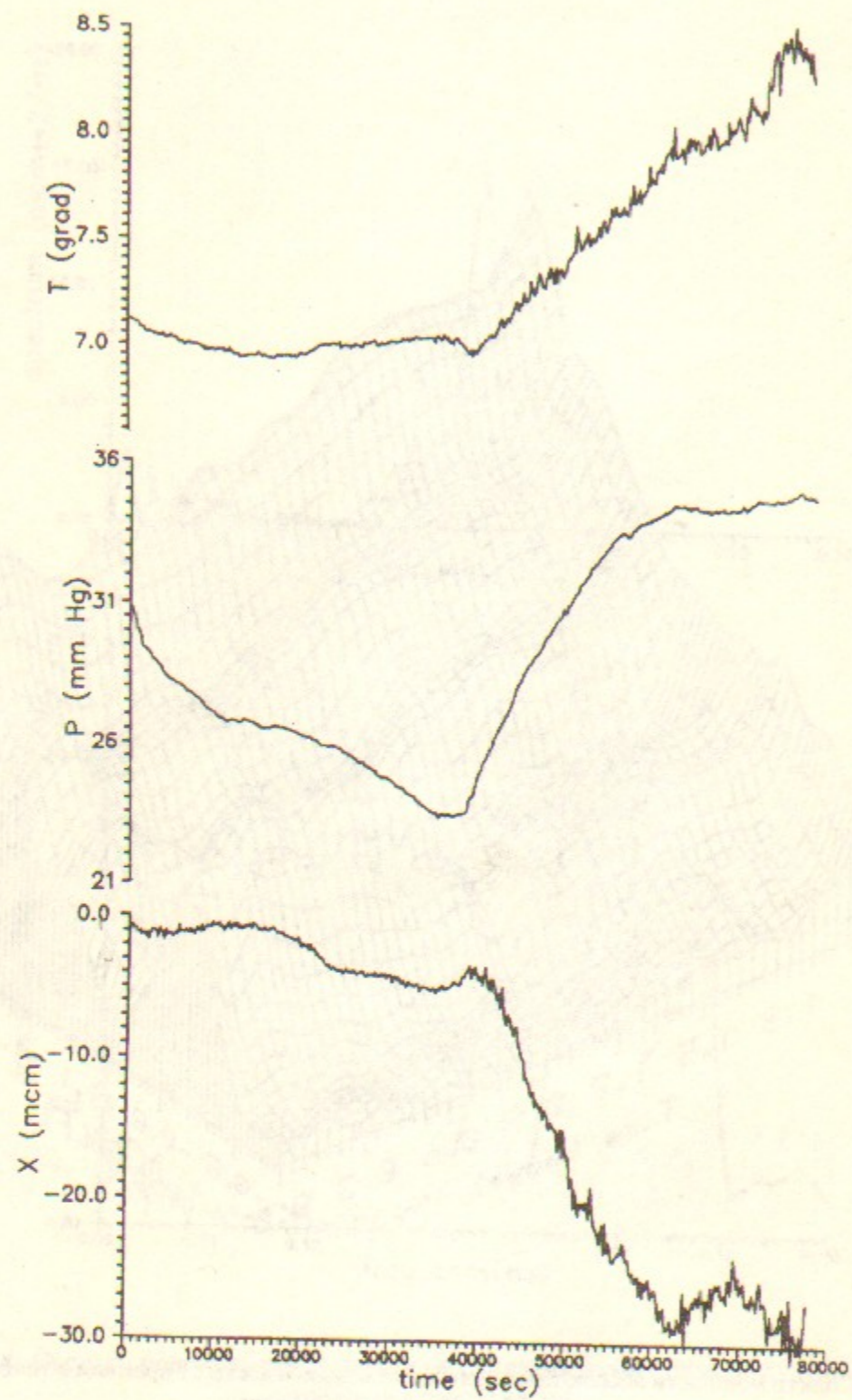


Рис. 10. Запись температуры, давления и относительного положения платформ в течение суток. Середина записи соответствует приходу области повышенного давления.

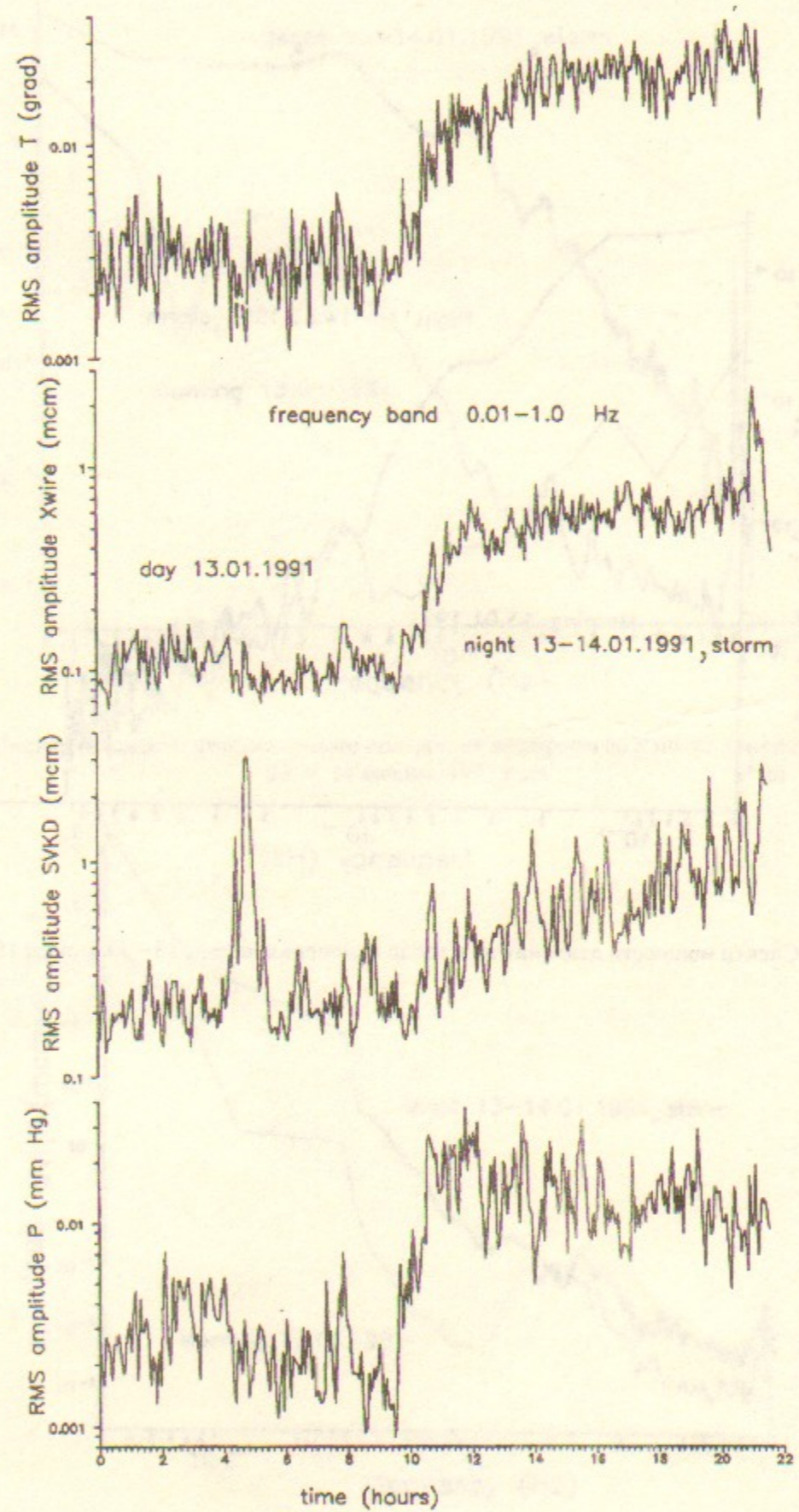


Рис. 11. Среднеквадратичные амплитуды в полосе 0.01 – 1.0 Гц в зависимости от времени. Середина записи соответствует приходу области повышенного давления.

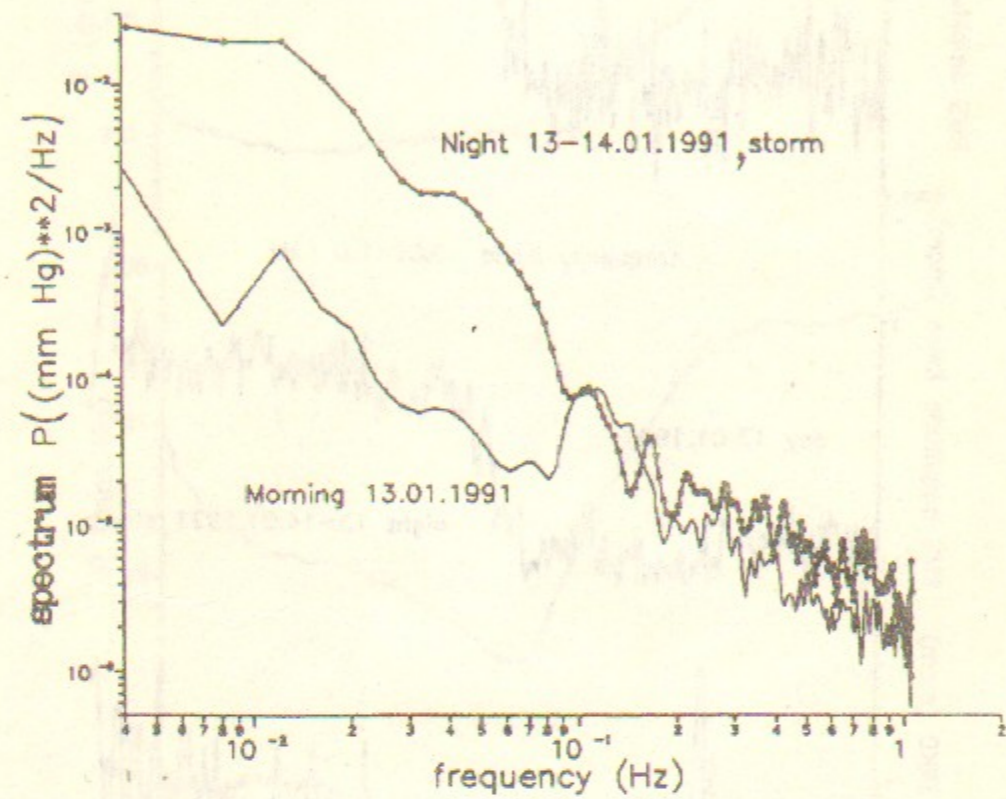


Рис. 12. Спектр мощности давления до и после изменения погоды 13 - 14 января 1991 года.

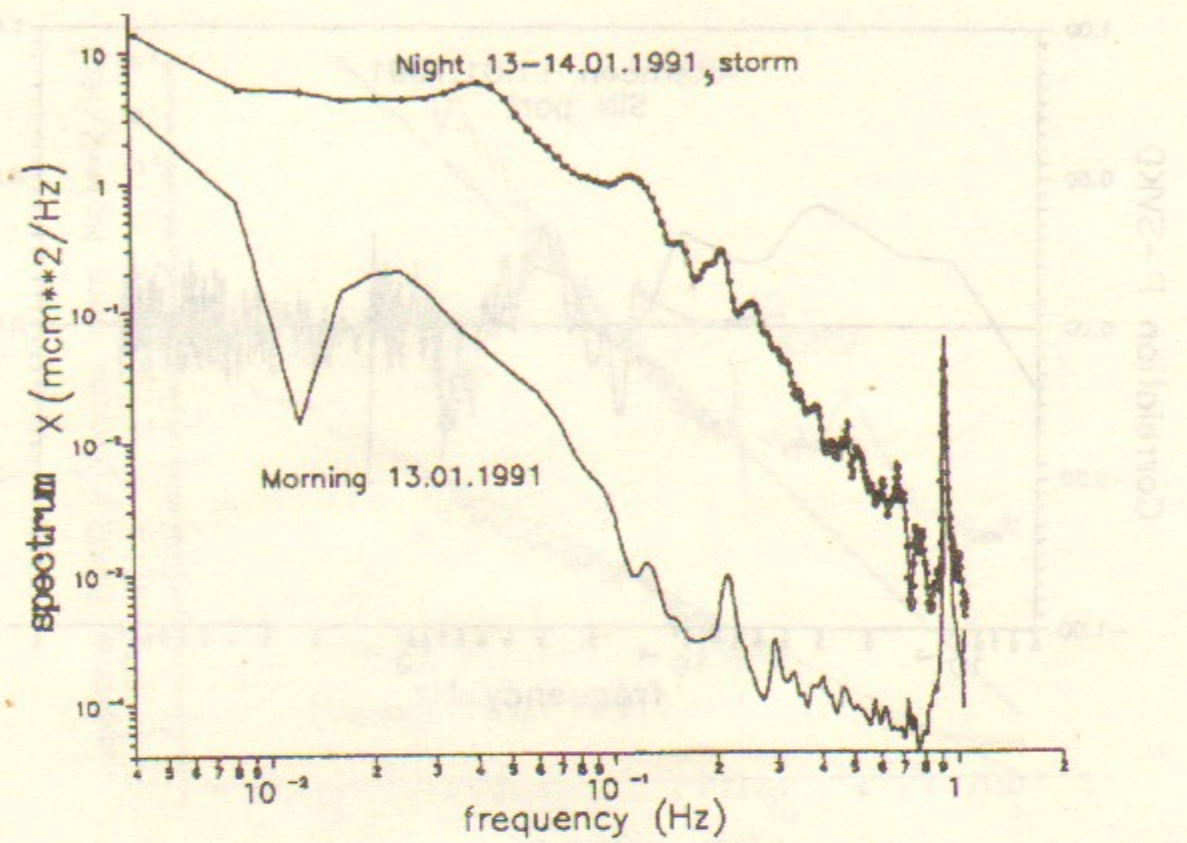


Рис. 13. Спектр мощности относительного положения платформ до и после изменения погоды 13 - 14 января 1991 года

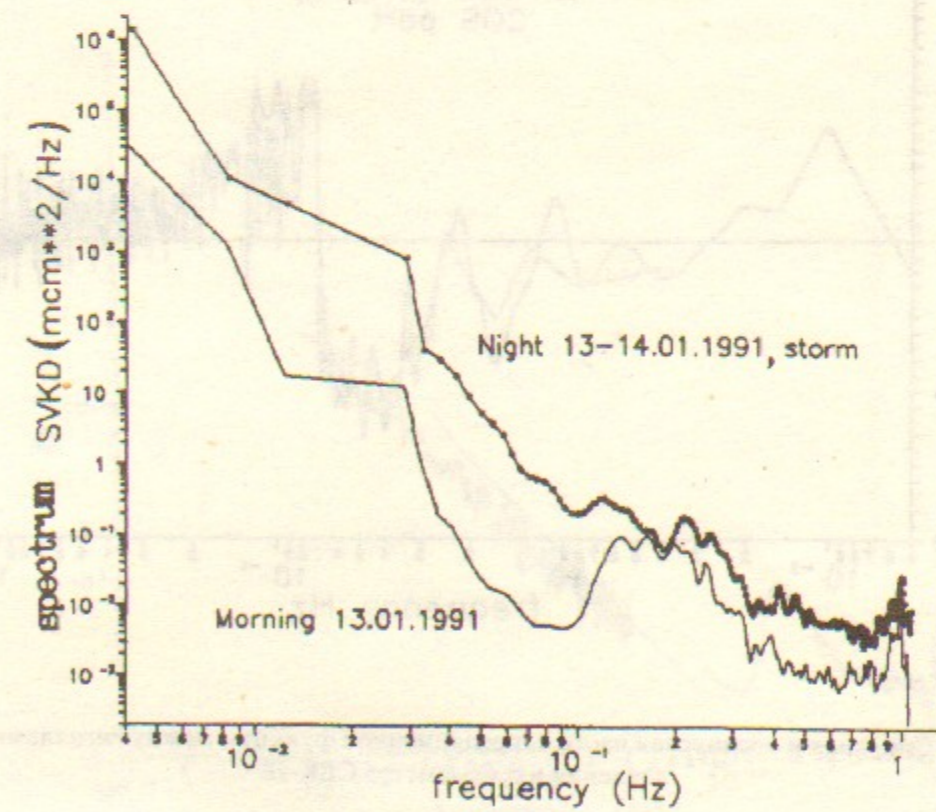


Рис. 14. Спектр мощности абсолютных колебаний поверхности до и после изменения погоды 13 - 14 января 1991 года

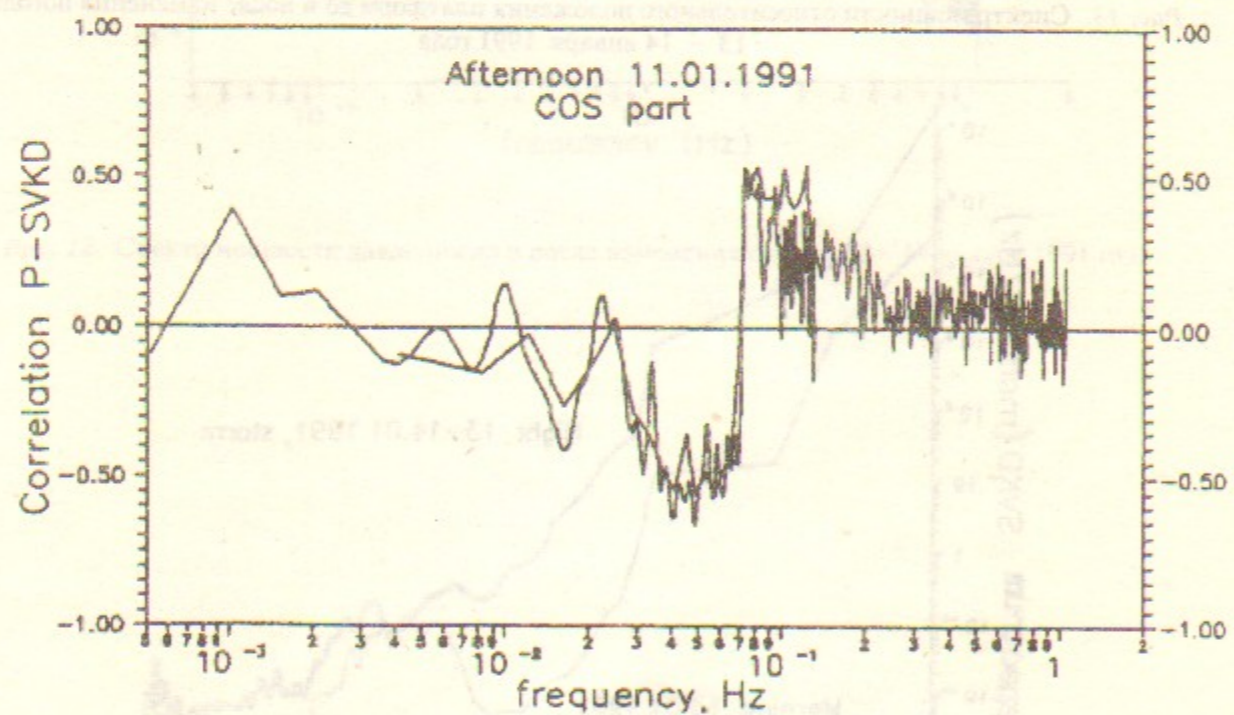
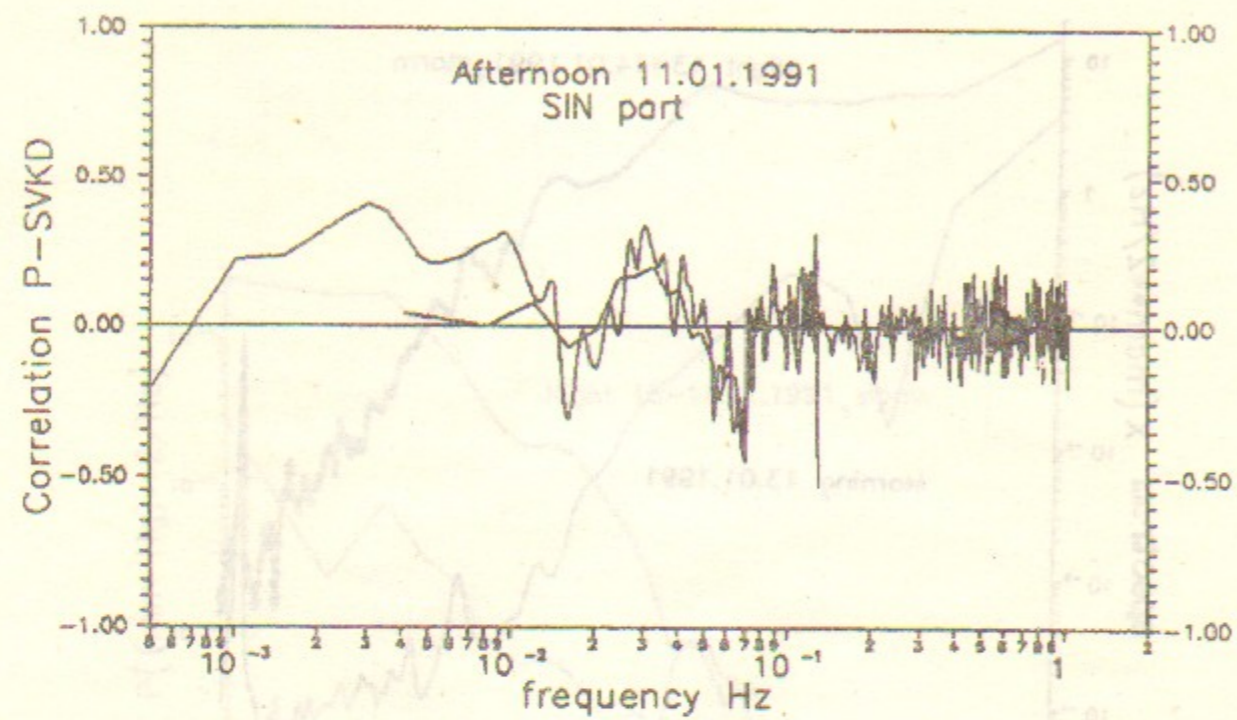


Рис. 15. Синусная и косинусная части корреляционной функции между сигналами датчика давления и сейсмографа СВК-Д.

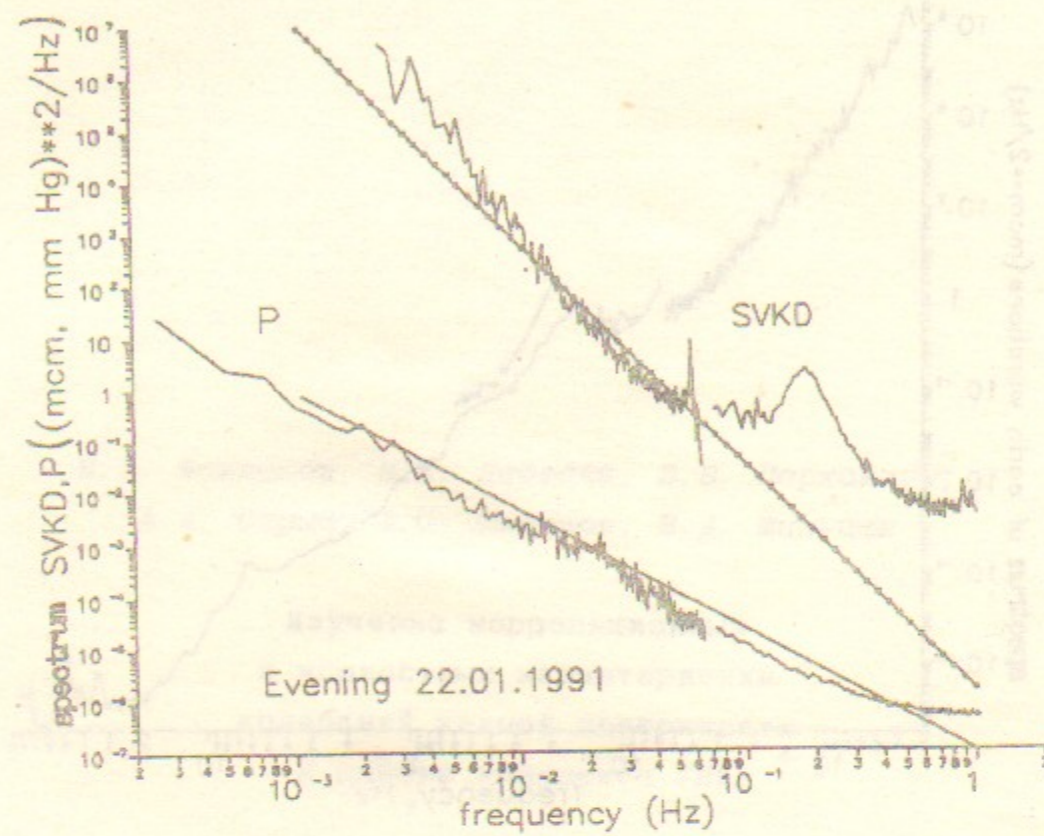


Рис. 16. Спектр мощности абсолютных колебаний поверхности и давления. Линии проведены по моделям (6.3) и (6.4).

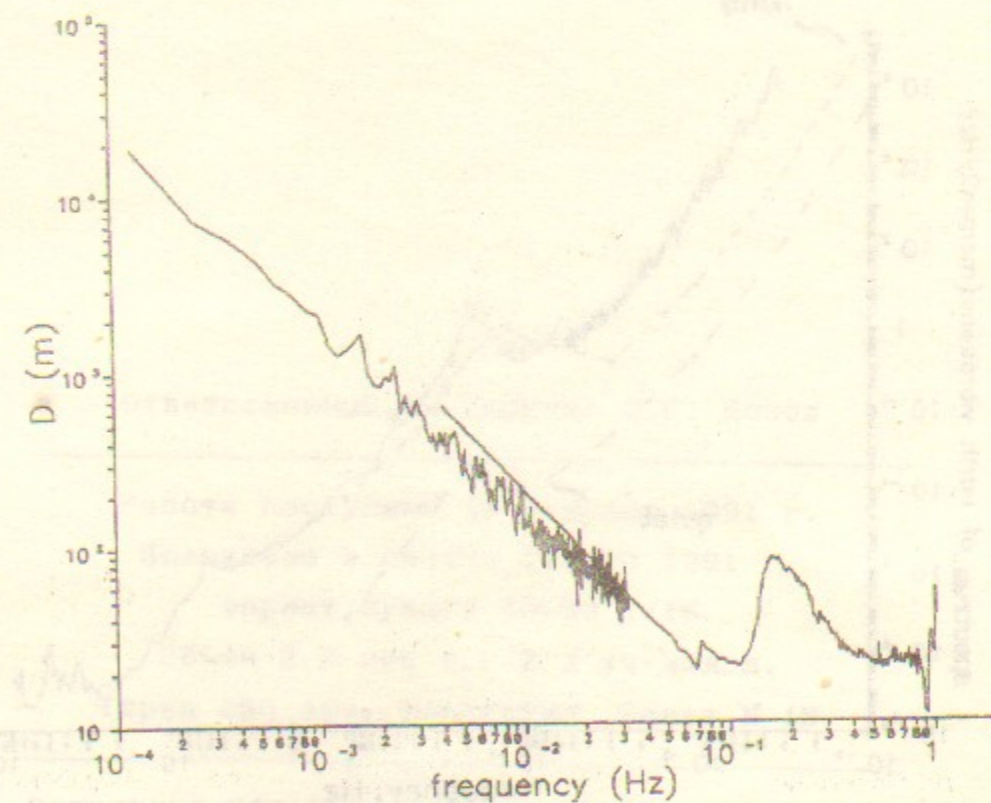


Рис. 17. Длина корреляции, определенная согласно (6.7).

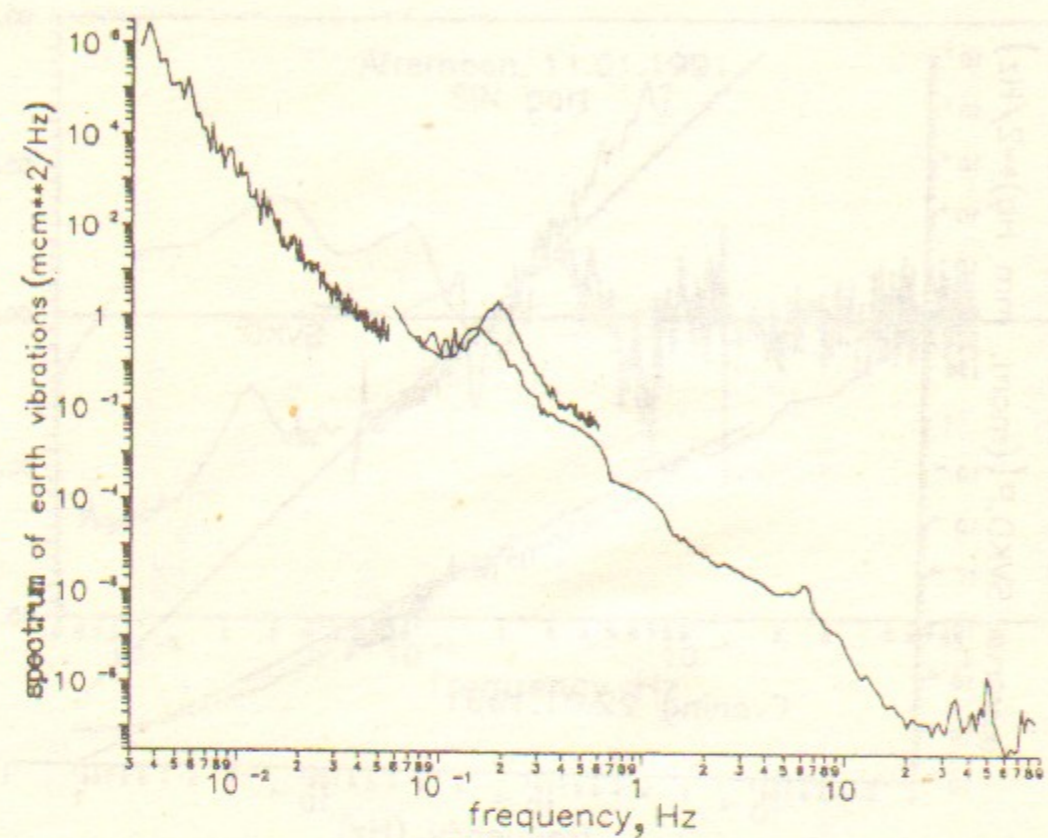


Рис. 18. Спектр мощности абсолютных колебаний поверхности в районе комплекса УНК.

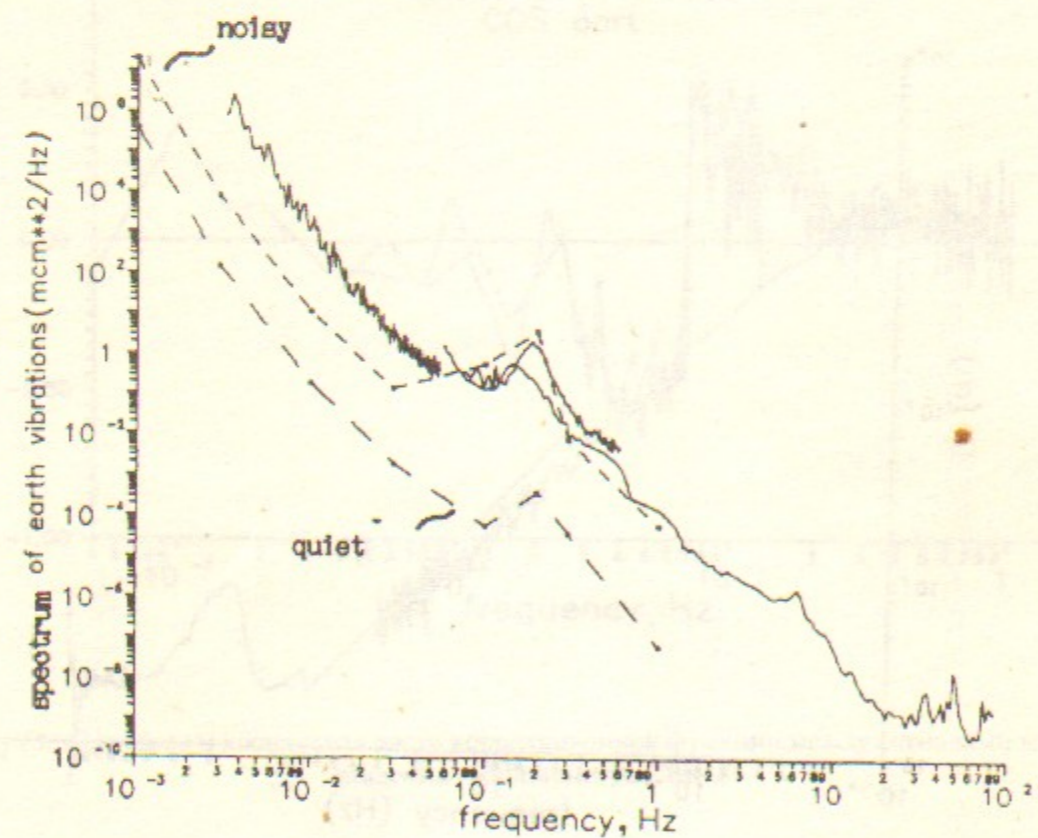


Рис. 19. Спектр мощности колебаний поверхности в сравнении с данными работы [8].

Б. А. Баклаков, П. К. Лебедев, В. В. Пархомчук,
А. А. Серый, А. И. Слепцов, В. Д. Шильцев

Изучение корреляционных
и мощностных характеристик
колебаний земной поверхности
в районе комплекса УНК

Ответственный за выпуск: С. Г. Попов

Работа поступила 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 14. 02 1991 г.

Формат бумаги 60x90 1/16.

Объем 2,8 печ. л., 2,3 уч.-изд. л.

Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ N 15.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г. Новосибирск, 90.