

10;12

©1993 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО КОЛЛАЙДЕРА ВЛЭПП

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

Представлены результаты измерений сейсмозумов в районе г. Протвино, где планируется построить линейный электрон-позитронный коллайдер ВЛЭПП и кольцевой коллайдер УНК. Измерения проводились в тоннеле УНК и на поверхности Земли. Исследовались спектральные характеристики колебаний грунта и основные факторы, определяющие колебания земли. В экспериментах обнаружено существенное влияние атмосферного давления на низкочастотные колебания поверхности Земли.

Введение

В линейных электрон-позитронных коллайдерах на высокие энергии для достижения высокой светимости требуются пучки со сверхмалыми поперечными размерами [1]. Например, для получения светимости $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в проектируемом линейном коллайдере ВЛЭПП поперечные размеры пучков в месте столкновения должны равняться $3 \times 0.001 \text{ мкм}$, а для проекта JLC (Япония) — $0.23 \times 0.0014 \text{ мкм}$ [2]. Для этого требуется очень точная выставка фокусирующих элементов ускорителя. Оценки показывают, что приемлемый уровень вибраций магнитных линз ВЛЭПП составляет 0.03 мкм для основной части ускорителя и 0.001 мкм для линз системы финальной фокусировки.

Вибрации различного происхождения вызывают отклонения элементов коллайдера от идеальной прямой линии. Предполагается, что во время работы линейного коллайдера оси магнитных линз фокусирующего тракта будут подстраиваться в соответствии с сигналами датчиков положения пучков для поддержания прямой траектории частиц. Для разработки такой системы необходимо знать уровни и корреляционные свойства вибраций.

В настоящей работе представлены результаты измерений сейсмозумов в районе г. Протвино, где планируется построить линейный электрон-позитронный коллайдер ВЛЭПП и кольцевой протонный коллайдер УНК. Измерения проводились в тоннеле УНК и на поверхности.

В тоннеле УНК исследовались спектры мощности и спектры корреляций для колебаний тоннеля. Измерения абсолютного и относительного движения участков земной поверхности, а также исследования влияния атмосферного давления на низкочастотное движение грунта проводились на поверхности. Эти эксперименты детально описаны в препринтах ИЯФ СО РАН [3-5].

Описание экспериментов и методики измерений

Подземные измерения проводились в тоннеле протонного ускорителя УНК на глубине около 30 метров от поверхности. Для измерений использовались серийные сейсмометры типа СМ-ЗКВ, работающие в полосе частот 0.03-100 Гц. Сигналы сейсмометров оцифровывались АЦП в стандарте КАМАК с частотой 700 или 80 Гц и записывались в блок памяти КАМАК. Для корреляционных измерений три таких сейсмодатчика выбранного типа (вертикальные или горизонтальные) устанавливались на расстоянии 40, 100 и 140 м друг от друга. Для таких исследований подбирались сейсмометры с близкими фазовыми характеристиками.

Исследования на поверхности проводились внутри лабораторного здания, при этом одновременно измерялись абсолютное и относительное движение точек поверхности, атмосферное давление и температура. Для определения колебаний земли в диапазоне частот 0.003-1 Гц использовался сейсмометр типа СВК-Д, в котором специально предусмотрена компенсация влияния изменений атмосферного давления. Период колебаний маятника СВК-Д составлял 14 с, время затухания колебаний 240 с. Вертикальные перемещения маятника сейсмометра измерялись с помощью емкостного сенсора, помещенного в контур автогенератора. Чувствительность измерителя положения маятника равнялась 200 Гц/мкм.

Для определения относительного движения точек поверхности использовался метод натянутой нити [3]. В этом методе измеряется смещение одного или нескольких пикап-электродов, закрепленных на исследуемой поверхности, относительно длинной нити — репера. В нашем случае к вольфрамовой нити диаметром 28 мкм и максимальной длиной 20 м прикладывались переменное напряжение, а в качестве пикап-электродов использовались плоские конденсаторы с зазором примерно 0.5 см. Стабильность определения перемещений этим датчиком определялась дрейфом измерительной системы, который составлял для коротких времен наблюдения (0.001-10 с) примерно 0.001 мкм, а для многочасовых измерений 0.02 мкм.

Температура воздуха определялась с помощью датчика на основе терморезистора с точностью $1.5 \cdot 10^{-4}$ град.

Датчик атмосферного давления был разработан и изготовлен в лаборатории и представлял собой два объема, разделенных проводящей мембраной. Один объем соединялся с атмосферой, другой был герметично закрыт и температура воздуха в нем поддерживалась постоянной. При изменении атмосферного давления мембрана изгибалась, что и измерялось емкостным измерителем. Дрейф определения изменения давления таким датчиком составлял $2 \cdot 10^{-3}$ мм ртутного столба при полосе частот ≤ 1 Гц.

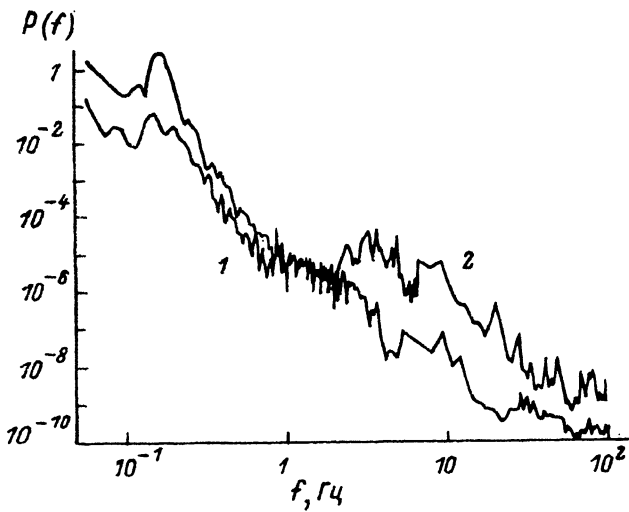


Рис. 1. Спектры мощности колебаний земли в тоннеле УНК $P(f)$ ($\text{мкм}^2/\text{Гц}$).

Результаты измерений

а) Спектры. Типичные спектры мощности вертикальных вибраций тоннеля УНК в тихих 1 (выходные дни) и шумных 2 (будни) условиях приведены на рис. 1. Можно видеть, что в “тихих” условиях спектр быстро падает с частотой f , в “шумных условиях” (строительные работы в тоннеле или на поверхности) уровни вибраций на частотах 1 Гц и выше увеличиваются более чем на два порядка. Спектры горизонтальных колебаний близки к представленным на рис. 1 по порядку величин и по форме.

Широкий пик в спектре на частоте около 0.14 Гц есть так называемый “микросейсмический пик” [6]. Происхождение этого пика обычно связывается в волнами ближайших морей, которые вызывают сейсмиче-

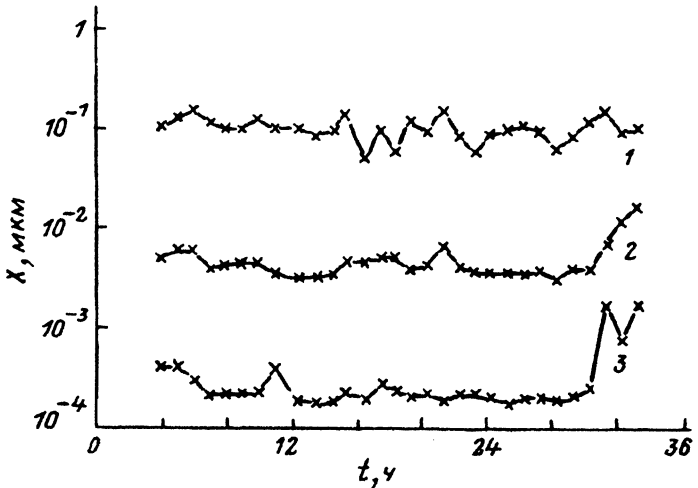


Рис. 2. Среднеквадратичные амплитуды колебаний земли $X(t)$ в разных частотных диапазонах в зависимости от времени 17-18.06.1990. 1 — $f < 0.1$, 2 — $f > 1$, 3 — $f > 10$ Гц.

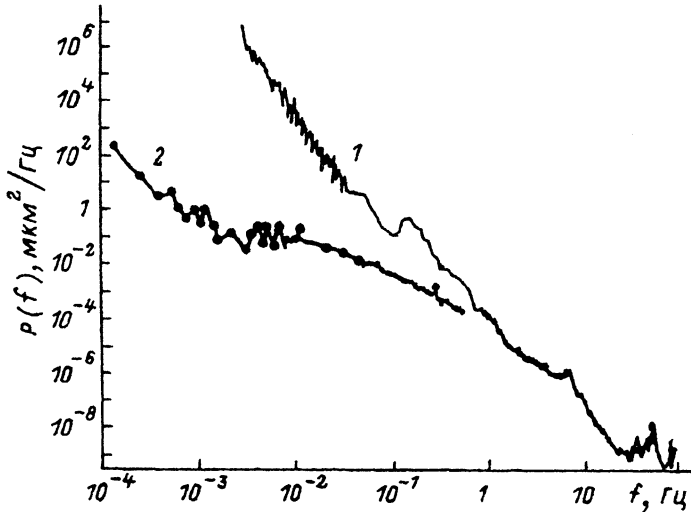


Рис. 3. Сравнение спектров $P(f)$ абсолютного (1) и относительного (2) движения точек поверхности.

ские колебания. Наши наблюдения показали, что высота и частота “микросейсмического пика” в Протвино зависят от состояния погоды над Атлантикой и Баренцевым морем.

Рис. 2 показывает, как меняются в течение суток среднеквадратичные амплитуды вибраций на частотах более 0.1, 1, 10 Гц. В тихих условиях (воскресенье, 17 июля 1990 г.) эти амплитуды на частотах более 1 Гц и более 10 Гц не превосходят 10^{-2} и 10^{-3} мкм соответственно, однако они резко возрастают с началом рабочего дня (понедельник, 18 июля 1990 г.) из-за появления техногенных шумов. На частотах порядка 0.1–1 Гц колебания тоннеля слабо зависят от технической активности.

На рис. 3 представлен спектр мощности относительных вертикальных перемещений двух подставок для линейного ускорителя, находящихся на расстоянии 5 м друг от друга, измеренных методом натянутой нити. На частотах ниже 1 Гц уровень относительных перемещений меньше, чем абсолютных (измеренных сейсмометром).

б) Влияние атмосферной активности на колебания земли. В ходе исследований мы обнаружили влияние изменений атмосферного давления на колебания грунта в диапазоне частот ниже 0.1 Гц. На рис. 4 представлен спектр взаимной корреляции (кросс-спектр) между давлением и сигналом с низкочастотного сейсмометра СВК-Д. Спектр корреляции $K(\omega)$ двух сигналов $X(t)$ и $Y(t)$ есть, по определению, величина

$$K(\omega) = \text{Re} \frac{\langle X(\omega) \cdot Y^*(\omega) \rangle}{[\langle |X(\omega)|^2 \rangle \cdot \langle |Y(\omega)|^2 \rangle]^{1/2}} \quad (1)$$

Здесь угловые скобки $\langle \dots \rangle$ означают усреднение по многократным измерениям, $X(\omega)$ — Фурье-образ $X(t)$. Видна значительная корреляция на частотах ниже 0.1–0.2 Гц. Скачок на частоте 0.07 Гц имеет приборное происхождение и связан с фазовой характеристикой сейсмометра СВК-Д на собственном резонансе. На частотах ниже 0.02 Гц корреляция мала ввиду недостаточной чувствительности сейсмометра.

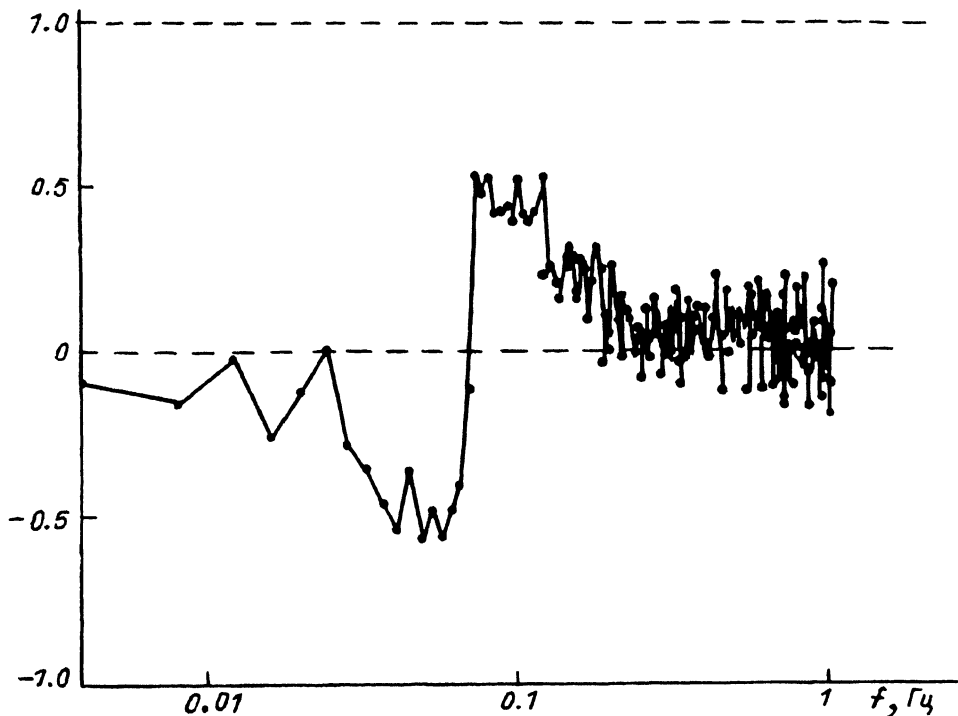


Рис. 4. Частотный спектр корреляции атмосферного давления и сигнала с сейсмометра СВК-Д (11.01.1991).

На рис. 5 представлены спектры мощности колебаний земли до начала (кривая 1) и во время (кривая 2) сильной снежной бури (пурга). Хорошо видно сильное увеличение мощности колебаний земли на частотах ниже 0.1 Гц. Кроме того, во время прихода фронта плохой погоды было зафиксировано относительное вертикальное перемещение упоминавшихся выше платформ-подставок на 30 мкм при резком уменьшении давления на 10 мм рт. ст.

Оценки воздействия атмосферы на прогибы земли проведены нами в [5] и базируются на законе Колмогорова-Обухова для турбулентных течений газа [7], который предсказывает флуктуации скорости V_λ для области потока размером λ ,

$$V_\lambda \simeq U \cdot (\lambda/L)^{1/3}. \quad (2)$$

Здесь U , L — средняя скорость и характерный размер основного потока. Если принять, что земля представляет собой полупространство с постоянным модулем Юнга E , прогибающееся под действием флуктуаций давления ΔP в турбулентном потоке воздуха

$$X \simeq \Delta P \cdot \lambda / E, \quad (3)$$

то спектр мощности движения точек поверхности под действием флуктуации давления будет выражаться формулой [5]

$$S(X)_f \simeq \rho^2 \cdot U^{22/3} \cdot E^{-2} \cdot L^{-4/3} \cdot f^{-13/3} / 4 \quad (4)$$

(ρ — плотность воздуха).

При параметрах $U = 3 \text{ м/с}$, $L = 5000 \text{ м}$ и $E = 10^8 \text{ Н/м}^2$ эта формула хорошо аппроксимирует экспериментально измеренные спектры на частотах $0.001\text{--}0.1 \text{ Гц}$ [5].

При очень низких частотах ($f < g/(2\pi c) \simeq 2 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}$, если скорость звука в земле $c \simeq 5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ и ускорение свободного падения $g \simeq 10 \text{ м/с}^2$) правильнее рассматривать землю не как твердое эластичное тело, а как жидкость с плотностью $\bar{\rho}$. Тогда прогиб поверхности при изменении давления на ΔP равен

$$X \simeq \Delta P / (\bar{\rho} \cdot g). \quad (5)$$

Отсюда грунт со средней плотностью $\bar{\rho} = 3000 \text{ кг/м}^3$ при изменении давления на 10 мм рт.ст. переместится на 40 мм .

в) Сверхнизкочастотное движение точек поверхности земли. Кроме колебательного регулярного движения земли существует еще и движение типа диффузии, вызываемое появлением и разрядкой внутренних напряжений в неэластичной и неоднородной среде грунта [5,8]. Под действием этих микроскачков все точки поверхности совершают движения, подобные броуновскому.

Для систематизации имеющихся у нас экспериментальных данных мы предположили, что дисперсия относительного перемещения x двух точек поверхности пропорциональна расстоянию между ними L и времени наблюдения T

$$\langle x^2 \rangle = ATL, \quad (5a)$$

A — параметр модели.

В табл. 1 приведены результаты наших измерений горизонтальных (h) и вертикальных (v) относительных смещений с помощью метода натянутой нити (строки 1–6), а также результаты оптического нивелирования в районе строительства протонного коллайдера УНК, выполненные другой группой (строки 7–9). Наша модель с параметром $A = 10^{-4} \text{ мкм}^2/\text{м/с}$ по порядку величины согласуется с этими измерениями. Кроме этого, в работе [9] представлены данные по 17-летним перемещениям 3-километрового тоннеля ускорителя SLС в США: максимальное смещение по вертикали составило 15 мм , а по горизонтали 7.5 мм ,

Таблица 1. Параметры смещения земли

Порядковый номер	$L, \text{ м}$	T	$X, \text{ мкм}$	$A \cdot 10^4, \text{ мкм}^2/\text{м/с}$
1	7 (v)	15 ч	6	0.9
2	7 (h)	15 ч	13	1.4
3	1 (v)	8 ч	2	1.4
4	1 (h)	8 ч	3	3.0
5	1 (v)	66 ч	6	1.5
6	1 (h)	66 ч	4	0.6
7	100 (v)	2 г.	700	0.8
8	300 (v)	2 г.	1400	1.0
9	600 (v)	2 г.	1800	0.9

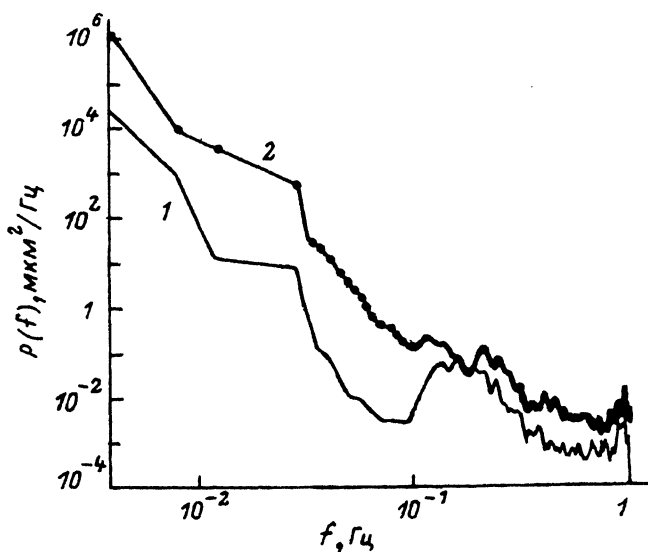


Рис. 5. Спектр мощности вибраций до (утро 13.01.1991) (1) и во время сильной пурги (ночь 13-14.01.1991) (2).

что дает параметр модели $A = 1.4 - 0.4 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}^2/\text{м/с}$. Несмотря на то что эти смещения были частично обусловлены также систематическими изменениями типа проседания грунта, по порядку величины они неплохо согласуются с нашими оценками.

На основании формулы (5) мы можем оценить перемещения центра будущего 20-километрового тоннеля линейного коллайдера ВЛЭПП за заданные промежутки времени (табл. 2), что необходимо знать для проектирования системы выставки ускорителя.

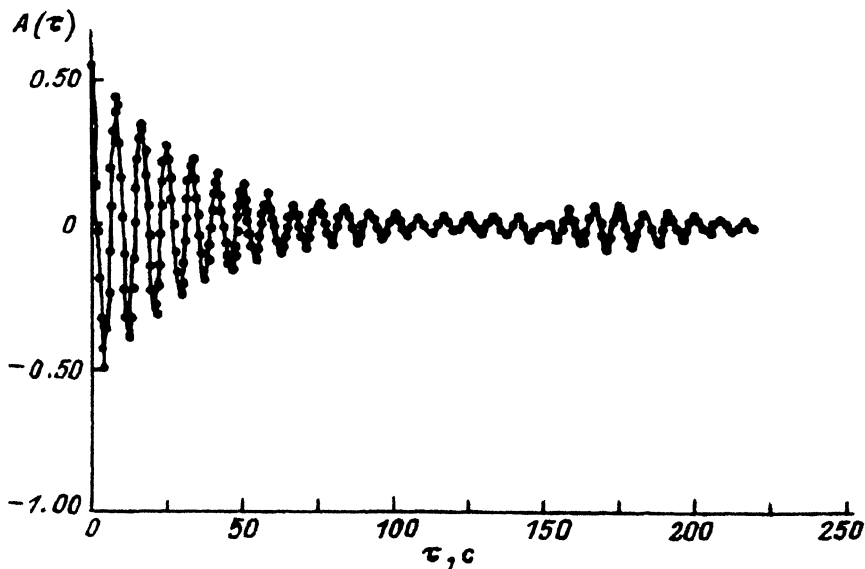


Рис. 6. Автокорреляционная функция для колебаний земли.

Таблица 2. Оценки смещения середины тоннеля ВЛЭПП

1 с	1 мин	1 ч	1 день	1 месяц	1 год	10 лет
1.4 мкм	11 мкм	84 мкм	415 мкм	2.3 мм	7.7 мм	24 мм

г) Корреляция колебаний. Пространственные и временные корреляционные свойства колебаний земли также важны для больших ускорителей. На рис. 6 приведена автокорреляционная функция $A(\tau)$ для измеренного движения земли $X(t)$, т.е.

$$A(\tau) = \frac{\langle X(t) \cdot X(t - \tau) \rangle}{\langle X^2(t) \rangle}. \quad (6)$$

Здесь угловые скобки $\langle \dots \rangle$ означают усреднение по t . Хорошо видны осцилляции функции $A(\tau)$ с периодом около 8 с из-за “микросейсмического пика”. До $\tau = 100$ с автокорреляционная функция хорошо аппроксимируется формулой

$$A(\tau) \simeq 0.55 \exp(-0.027\tau) \cos(2\pi \cdot 0.12\tau). \quad (7)$$

Кроме того, даже для времени $\tau = 200$ с автокорреляция весьма велика — порядка 0.2, что связано, возможно, со сложной композитной структурой “микросейсмического пика” [5].

Спектры взаимной корреляции для датчиков СМ-ЗКВ, расположенных на расстоянии 0, 40 и 140 м друг от друга, представлены на рис. 7. Как и следовало ожидать, для рядом стоящих датчиков корреляционная функция близка к единице (верхний график на рис. 7). С увеличением расстояния диапазон высокой (близкой к 1) корреляции сужается, на расстоянии 140 м хорошо коррелируют только колебания вблизи “микросейсмического пика”.

Если оценить корреляцию в предположении гармонических колебаний земли при экспериментально измеренных скоростях волн в тоннеле 600 и 1000 м/с для поперечной и продольной поляризаций соответственно, то для дистанции 140 м эта величина должна обращаться в 0 на частоте около 1.5 Гц (набег фазы равен $\pi/2$). При низких же частотах корреляция должна быть близкой к единице в отличие от представленной на рис. 7. Можно предположить, что ниже 0.1–0.05 Гц движение участков земли имеет частично локальный характер.

Заключение

В ходе экспериментальных исследований колебаний земли в районе сооружения ливнейного электрон-позитронного коллайдера ВЛЭПП и кольцевого протонного коллайдера УНК были измерены мощностные и корреляционные характеристики вибраций. Выявлен ряд существенных особенностей.

1. Спектры мощности сейсмических колебаний резко падают при увеличении частоты; в отсутствие сильной технической активности уровень вибраций с частотами 10 Гц и более не опасен для проекта ВЛЭПП, так как их амплитуды порядка 0.001 мкм.

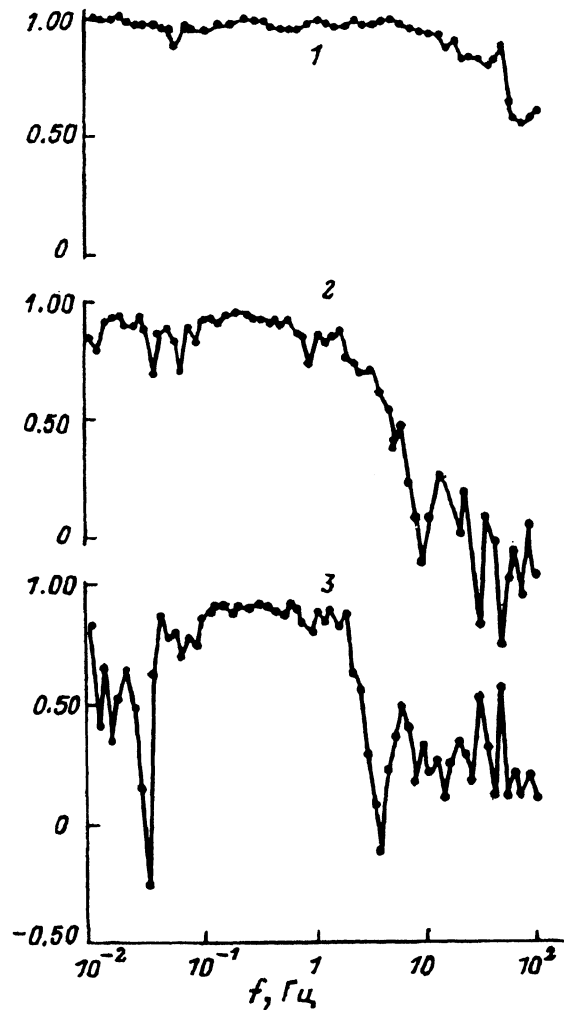


Рис. 7. Спектры корреляции для двух сейсмометров, находящихся на расстояниях 0 (1), 40 (2) и 140 м (3) друг от друга.

2. Колебания земли в диапазоне частот 0.1–1 Гц имеют амплитуды порядка 1 мкм, в диапазоне 1–10 Гц — около 0.01 мкм. Эти значения определяют требования на скорость и точность системы коррекции элементов ускорителя.

3. Движения земли на временах 10 с и более определяют диапазон медленной системы подстройки. Оценки предсказывают смещение середины 20-километрового тоннеля ускорителя ВЛЭПП на 80 мкм за 1 ч и 7 мм за год.

4. Все источники техногенного сейсмического шума (автодороги, компрессоры, вентиляторы и т.п.) должны быть по возможности удалены от коллайдера. Другой путь для исключения их влияния — подавление вибраций в месте их происхождения.

Авторы признательны В.Е.Балакину за полезные обсуждения. Мы также благодарим В.А.Токмакова и Н.Л.Трапезникова за помощь в наладке сейсмометров и В.М.Молявина за участие в подготовке измерений.

Список литературы

- [1] Балакин В.Е., Будкер Г.И., Скринский А.Н. // Тр. VI Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978. С. 27.
- [2] Proc. of Intern. Workshop on Next Generation Linear Colliders. Tsukuda (Japan), 1990.
- [3] Партомчук В.В., Шильцев В.Д. ФИЯФ-Р/89-02. Protvino, 1989.
- [4] Баклаков Б.А. и др. Препринт ИЯФ СО РАН. № 90-88. Новосибирск, 1990.
- [5] Баклаков Б.А. и др. Препринт ИЯФ СО РАН. № 91-15. Новосибирск, 1991.
- [6] Рыкунов Л.Н. Микросейсмы. М.: Наука, 1967.
- [7] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
- [8] Пономарев В.А. // Природа. 1991. № 10. С. 72.
- [9] Fischer G.E., Mayond M. CERN-LEP-RF-SU-88-07. CLIC Note 61. 1988.

Институт ядерной физики
Новосибирск

Поступило в Редакцию
6 ноября 1992 г.
В окончательной редакции
17 мая 1993 г.