

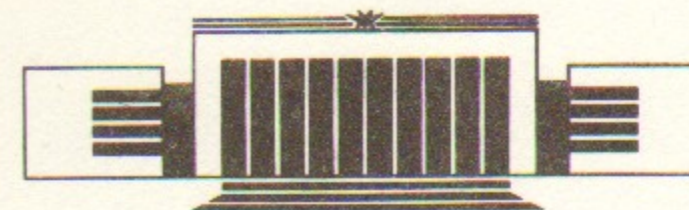


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Б.А. Баклаков, П.К. Лебедев, В.В. Пархомчук,
В.А. Токмаков, Н.Л. Трапезников, А.А. Серый,
В.Д. Шильцев

**ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ
В ТОННЕЛЕ УНК**

ПРЕПРИНТ 90-88



НОВОСИБИРСК

Измерение уровня вибраций в тоннеле УНК

Б.А. Баклаков, П.К. Лебедев, В.В. Пархомчук,
В.А. Токмаков^{*)}, Н.Л. Трапезников^{*)}, А.А. Серый,
В.Д. Шильцев

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты измерений уровня вибрации в тоннеле УНК. Данные необходимы для проектирования линейного электрон-позитронного суперколлайдера ВЛЭПП, который предполагается построить рядом с протонным комплексом УНК.

^{*)} Институт физики Земли АН СССР, Москва

ВВЕДЕНИЕ

Для достижения высокой светимости на линейных электронных коллайдерах сверхвысоких энергий необходимы пучки позитронов и электронов с малыми поперечными размерами [1]. Например, в ускорителе ВЛЭПП (СССР) для получения светимости $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ размеры пучков в месте встречи должны составлять примерно 0,001 мкм по вертикали и 1,0 мкм по горизонтали, а в ускорителе JLC (Япония) — соответственно 0,001 и 0,2 мкм [2]. Для сохранения столь малых размеров пучков требуется высокая стабильность поддержания положения ускоряющих ВЧ-секций и фокусирующих линз в пространстве.

Как предполагается, при работе ускорителя ВЛЭПП медленные уходы фокусирующих линз будут компенсироваться по измерениям положения пучка путем соответствующих сдвигов положений их магнитных осей. При этом, для точной компенсации важны не только сами вибросмещения, но и их временная и пространственная корреляция.

В качестве грубой оценки необходимых требований можно сказать, что в диапазоне частот более 10 Гц, согласно расчетам [2], необходимо поддерживать стабильность положения ускоряющих ВЧ-секций ускорителя на уровне $\sim 10^{-1}$ мкм, а фокусирующих линз на уровне $\sim 10^{-2}$ мкм. Более серьезные ограничения накладываются на стабильность элементов в районе места встречи пучков («финальный фокус»), где требуется поддерживать положение линз на уровне 10^{-3} мкм.

В связи с этим, нужно знать уровень вибрационного смещения грунта в зависимости от частоты в предполагаемом районе сооружения ускорителя, что в случае необходимости позволит предусмотреть необходимые меры защиты.

Сооружаемый в настоящее время тоннель УНК неплохо подходит для измерений, так как тоннель ускорителя ВЛЭПП будет расположен рядом, по касательной к кольцу УНК на такой же глубине под поверхностью земли (30—50 м).

УСТАНОВКА И ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Место измерений располагалось в 3 км к северу от действующего ускорителя У-70, в районе 16-го шахтного ствола УНК. Это место было выбрано как наиболее тихое на строящемся кольце УНК.

Измерялись колебания пола тоннеля УНК в трех направлениях: по вертикали и по горизонтали—вдоль и поперек тоннеля. Датчики устанавливались на бетонную платформу размером $1 \times 1 \times 0,2$ м на стальной обшивке пола тоннеля. Кроме того, для сравнения, измерялись колебания грунта на поверхности земли с такой же ориентацией датчиков.

Датчиками перемещений служили промышленные сейсмометры типа СМ-3КВ, предназначенные для измерений в диапазоне от 0,5 до 20 Гц. Для расширения рабочего диапазона частот в область низких частот до $\approx 0,1$ Гц и в сторону высоких частот до ≈ 100 Гц сейсмометры были дополнены блоками формирования характеристик (БФХ) [3], располагавшимися внутри корпусов сейсмометров.

Отношение напряжения на выходе такой системы к смещению в зависимости от частоты f в интервале от 0,1 до 100 Гц с точностью $\approx 10\%$ для всех наших приборов описывается зависимостью $5,2 \cdot 10^5 \cdot f$ [В/м]. Ниже 0,1 Гц и выше 100 Гц чувствительность датчиков была меньше, чем по приведенной формуле.

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

Измерения проводились при двух частотах опроса АЦП: 700 Гц, когда можно было не беспокоиться об искажении спектра за счет эффекта наложения частот (см., например, [5]), и при 80 Гц для подробной «прорисовки» спектра колебаний в области низких ($\sim 0,1$ Гц) частот. Длительность записи равнялась примерно 40 секундам при частоте опроса АЦП, равной 700 Гц и 5 минутам—при 80 Гц.

Набор данных производился каждый час круглосуточно с пятницы-субботы до понедельника (14—16 апреля и 16—18 июня 1990 года) для того, чтобы увидеть не только естественные колебания грунта, но и изменение уровня колебаний с началом и окончанием рабочего дня. Кроме этого, записывались реакции датчиков в тоннеле на некоторые виды возбуждения вибраций на поверхности земли: автотранспорт, прыжки на бетонной площадке около домика и т. п.

В промежутках между наборами информации комплекс аппаратуры позволял проводить предварительную обработку данных, записанных при измерениях на жесткий диск: просмотр данных, построение спектров колебаний, вывод результатов на цветной графический дисплей и получение печатной копии «картинки».

На рис. 1 для иллюстрации приведены записи сейсмосигналов вертикального датчика при частоте опроса 700 и 80 Гц. Видно, что основная частота сигнала примерно равна 0,15 Гц, и, как известно [6], обусловлена активностью атмосферы и мирового океана («штормовые» микросейсмы). На рис. 1,а в диапазоне времени до 10 секунд на уровне микросейсм заметен вклад в колебания с большей частотой от автомашины, проезжающей по дороге в 70 метрах от датчика.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения, выполненные при частоте опроса 700 и 80 Гц, обрабатывались по разной методике.

В первом случае, когда не наблюдалось искажение спектра из-за эффекта наложения частот (частота Найквиста равна 350 Гц) фильтрация данных для подавления высокочастотных составляющих не проводилась. При построении спектра мощности колебаний в интервале от 10 до ≈ 100 Гц для выявления деталей спектра достаточно иметь разрешение по частоте порядка 1 Гц. В

связи с этим временная запись делилась на отрезки длиной примерно 3,0 с, по каждому из которых находился спектр, а полученные 13 спектров усреднялись. Результирующий спектр мощности сглаживался по частоте по Хеннингу (см., [5]) и имел разрешение по частоте 0,34 Гц при относительной точности оценки амплитуд линий примерно 25%.

При обработке данных, полученных при частоте опроса АЦП 80 Гц, для уменьшения искажения спектра в области низких частот из-за эффекта наложения частот вводился цифровой фильтр суммирующего типа (см., например, [5]). При этом усреднялись несколько соседних значений временного ряда. Для получения оценки спектра от 2,5 до 10 Гц усреднялись 4 соседних значения, а для интервала 0—2,5 Гц — 16 соседних значений временного ряда. В соответствии с этим разрешение по частоте составляло 0,04 и 0,01 Гц, соответственно, а точность ≈ 25 и $\approx 40\%$.

По полученным спектрам мощности также вычислялись среднеквадратичные смещения грунта с частотой больше заданной, например, 1, 10 Гц и т. д.

На рис. 2 приведены спектры мощности колебаний по вертикали, полученные при различных условиях. Как видно, в наиболее тихих условиях измерений в субботу 16 июня с 20.30 до 23.30 (кривая 1) в спектре выделяется несколько пиков. Как и ожидалось, имеется пик на частоте порядка 0,1 Гц, связанный с микросейсмами. Выделяется пик с частотой 50 Гц — сетевая наводка на индукционную катушку сейсмометра. Кроме того, имеется поднятие спектра в районе 2—4 Гц, и выделяется пик в районе 10 Гц. Две последние особенности спектра, по-видимому, связаны с техногенной активностью удаленных источников. Среднеквадратичные смещения в диапазоне частот более 0,05, 1,0 и 10 Гц равняются $0,25$, $3,3 \cdot 10^{-3}$ и $2,4 \cdot 10^{-4}$ мкм, соответственно.

Для спектра мощности, полученного в течение рабочего дня, в понедельник 18 июня с 7.00 до 10.00 (кривая 2), когда около домика на поверхности земли ведутся строительные работы (работает экскаватор, по грунтовой дороге ездят тяжелые грузовики и т. д.), характерно увеличение уровня смещений в диапазоне 1—50 Гц. Как видно, появилось много пиков в диапазоне 20—50 Гц. Среднеквадратичные смещения на частотах выше 1 и 10 Гц составили $1,1 \cdot 10^{-2}$ и $1,1 \cdot 10^{-3}$ мкм, соответственно, т. е. увеличились примерно в 3—4 раза.

Для сравнения на рис. 2 приведены также измерения спектра мощности колебаний, выполненные в сейсмологической лаборато-

рии Калифорнийского университета, расположенной в глубокой шахте в наиболее тихих условиях [7]. Сравнение кривых 1 и 3 показывает, что наши тихие условия таковыми можно назвать условно: в области частот более 1 Гц мощность спектра в наших условиях на 2-3 порядка больше, чем в условиях калифорнийской сейсмостанции. Это превышение, по-видимому, можно связать с техногенными шумами близлежащих городов: Протвино, Серпухова, Москвы.

Важное значение имеет информация о корреляции колебаний заданной частоты в точках, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Мы имели возможность построить корреляционную функцию для датчиков, находящихся на поверхности земли, около домика с регистрирующей аппаратурой и в тоннеле. Расстояние между датчиками равнялось 35 метрам.

На рис. 3 приведена корреляция между горизонтальными датчиками в зависимости от частоты. Видно, что в диапазоне частот до 1 Гц колебания в точках с расстоянием 35 м полностью коррелированы. Степень корреляции быстро уменьшается и колебания с частотой более 20 Гц можно считать практически не коррелированными.

Зависимость среднеквадратичных смещений в диапазоне частот выше 0,1, 1 и 10 Гц от времени в весеннем и летнем сеансе наблюдений приведены на рис. 4 и рис. 5, соответственно.

Как видно из рис. 4, уровень смещений за счет микросейсмов составляет 0,5—1,0 мкм, не сильно (1,5 раза) меняется за время наблюдения и от вибраций, связанных с производственной активностью в районе измерений.

Уровень смещений с частотой более 1 Гц в тихое время (воскресенье, ночь) составляет примерно $(5 \div 8) \cdot 10^{-3}$ мкм как по вертикали, так и по горизонтали. Окончание и начало рабочего дня наиболее четко проявляется в резком увеличении уровней по вертикали примерно до $2 \cdot 10^{-2}$ мкм. По горизонтали это увеличение проявляется значительно меньше.

Смещения с частотой более 10 Гц составляют в тихое время $(4 \div 8) \cdot 10^{-4}$ мкм. В этом диапазоне частот окончание и начало производственной активности четко видно в увеличении уровней как по вертикали, так и по горизонтали до уровня $(2 \div 3) \cdot 10^{-3}$ мкм.

В диапазоне частот более 10 Гц хорошо видно влияние автотранспорта и других видов возбуждения колебаний на уровень смещения грунта в тоннеле. Так прохождение грузовой автомаши-

ны со скоростью около 40 км/час по дороге с покрытием из бетонных плит, находящейся на расстоянии 70 м от места измерений, увеличивает уровень смещений как по вертикали, так и по горизонтали в перпендикулярном оси тоннеля направлении примерно до $(6 \div 10) \cdot 10^{-4}$ мкм, т. е. в 2-3 раза. Аналогичные увеличения происходят и при других указанных способах возбуждения колебаний. Прыжки одного из авторов весом около 80 кг с частотой ≈ 1 Гц на бетонной площадке около домика приводят к увеличению смещений в диапазоне частот выше 10 Гц примерно в 2 раза.

Из рис. 5 видно, что летом в тихое время смещения в диапазоне частот больше 1 Гц несколько меньше, чем весной, составляют примерно $(3 \div 6) \cdot 10^{-3}$ мкм и увеличиваются с началом рабочего дня до $(1 \div 2) \cdot 10^{-2}$ мкм, причем по вертикали в большей степени. В диапазоне частот более 10 Гц смещения составляют примерно $(2,5 \div 4) \cdot 10^{-4}$ мкм и возрастают до $(1,5 \div 2) \cdot 10^{-3}$ мкм с началом рабочего дня. На рис. 5 видно, что работа по забиванию бетонных свай, проводившаяся на расстоянии $\approx 1,5$ км от места измерений, увеличивает уровень смещений примерно до 10^{-2} мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные измерения показывают, что естественные уровни смещений грунта в месте предполагаемого размещения комплекса ВЛЭПП не превосходят 10^{-2} мкм в диапазоне частот более 1 Гц и 10^{-3} мкм с частотой более 10 Гц.

Таким образом, защита элементов ВЛЭПП от высокочастотных вибраций для получения светимости 10^{-34} см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ не требуется.

Следует обратить внимание на очень быстрый рост мощности шумов при понижении частоты, что накладывает особые требования на системы подстройки магнитных осей квадрупольных линз ускорителя. Для обеспечения нужной точности при коррекции положения осей, по-видимому, необходимо будет учитывать не только их смещение, но и скорость движения и, может быть, ускорение.

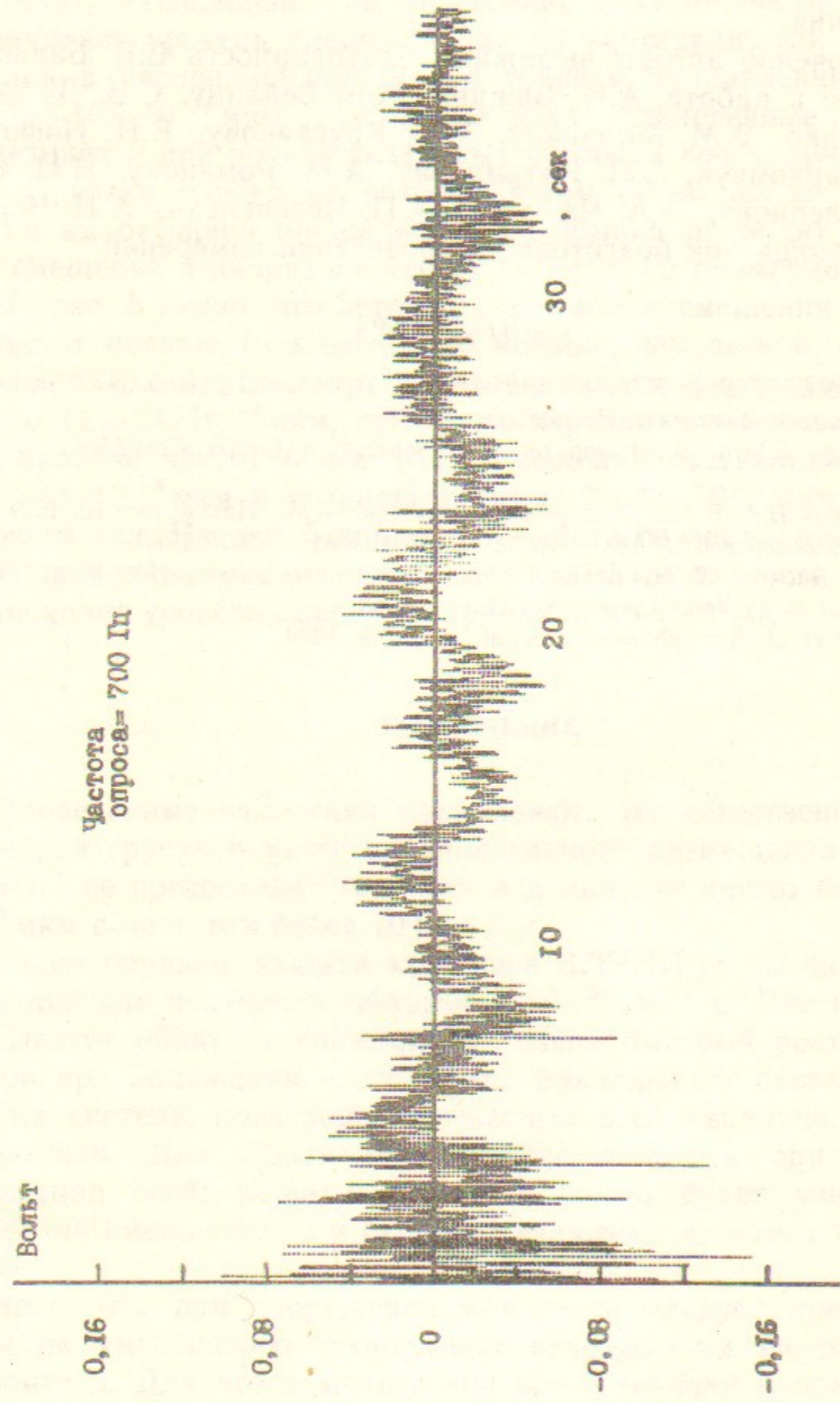
Ясно, что при сооружении комплекса следует предусмотреть меры по уменьшению техногенных возбуждений на работающий ускоритель. Для этого желательно все источники вибраций: автомобильные дороги, компрессоры, вентиляционное оборудование — располагать на достаточном удалении от трассы ВЛЭПП, либо

научиться демпфировать возбуждаемые ими колебания в месте возникновения.

В заключение авторы выражают благодарность В.Е. Балакину за внимание к работе, А.И. Бажану, М.В. Бейлину, С.В. Дуброву, А.С. Медведко, В.М. Молявину, М.Э. Круглякову, В.И. Нифонтову, Г.М. Пархомчук, А.Н. Путьмакову, А.М. Романову, Н.И. Саксу, А.И. Слепцову, А.А. Чаюкову, А.П. Черепенько, А.Н. Чернышову за помощь при подготовке и проведении измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В.Е., Будкер Г.И., Скринский А.Н. Проблемы физики выс. энергий и упр. термоядер. синтеза. — Новосибирск, 1978.
2. Proceedings Intern. Workshop on Next-Generation Linear Colliders, Stanford, 1988.
3. Трапезников Н.А. В сб.: Сейсмические приборы. — М.: Наука, вып.10, 1977.
4. Блоки в стандарте КАМАК. — Сообщ. ИЯФ СО АН СССР, 1983.
5. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. — М.: Мир, 1982.
6. Рыкунов Л.Н. Микросейсмы. — М.: Наука, 1967.
7. Mast T.S. et al. Astrophysical journal, 187, L49, 1974.



— Рис. 1а. Сейсмосигнал с вертикального датчика при частоте опроса 700 Гц.

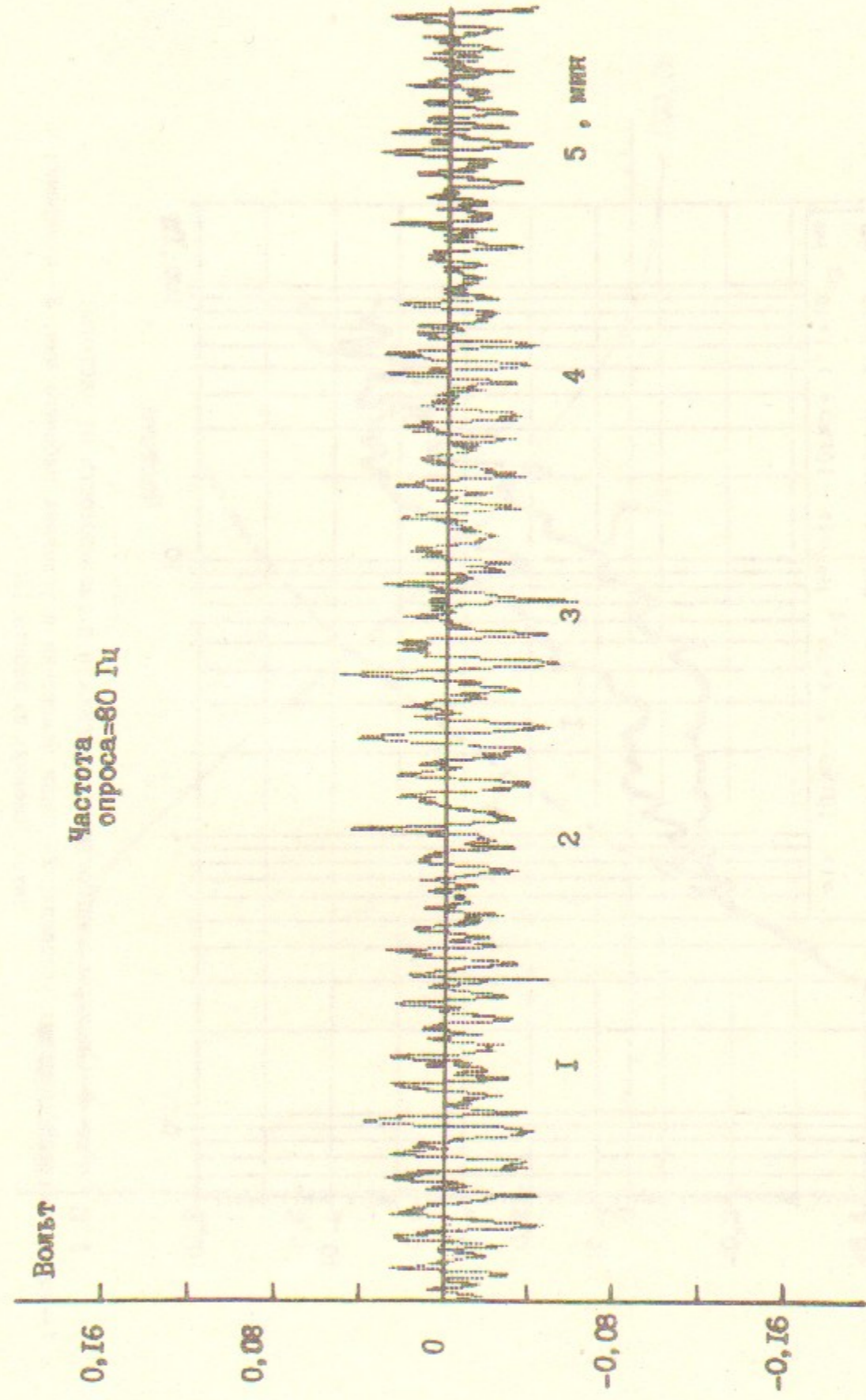


Рис. 1б. То же самое при частоте опроса 80 Гц.

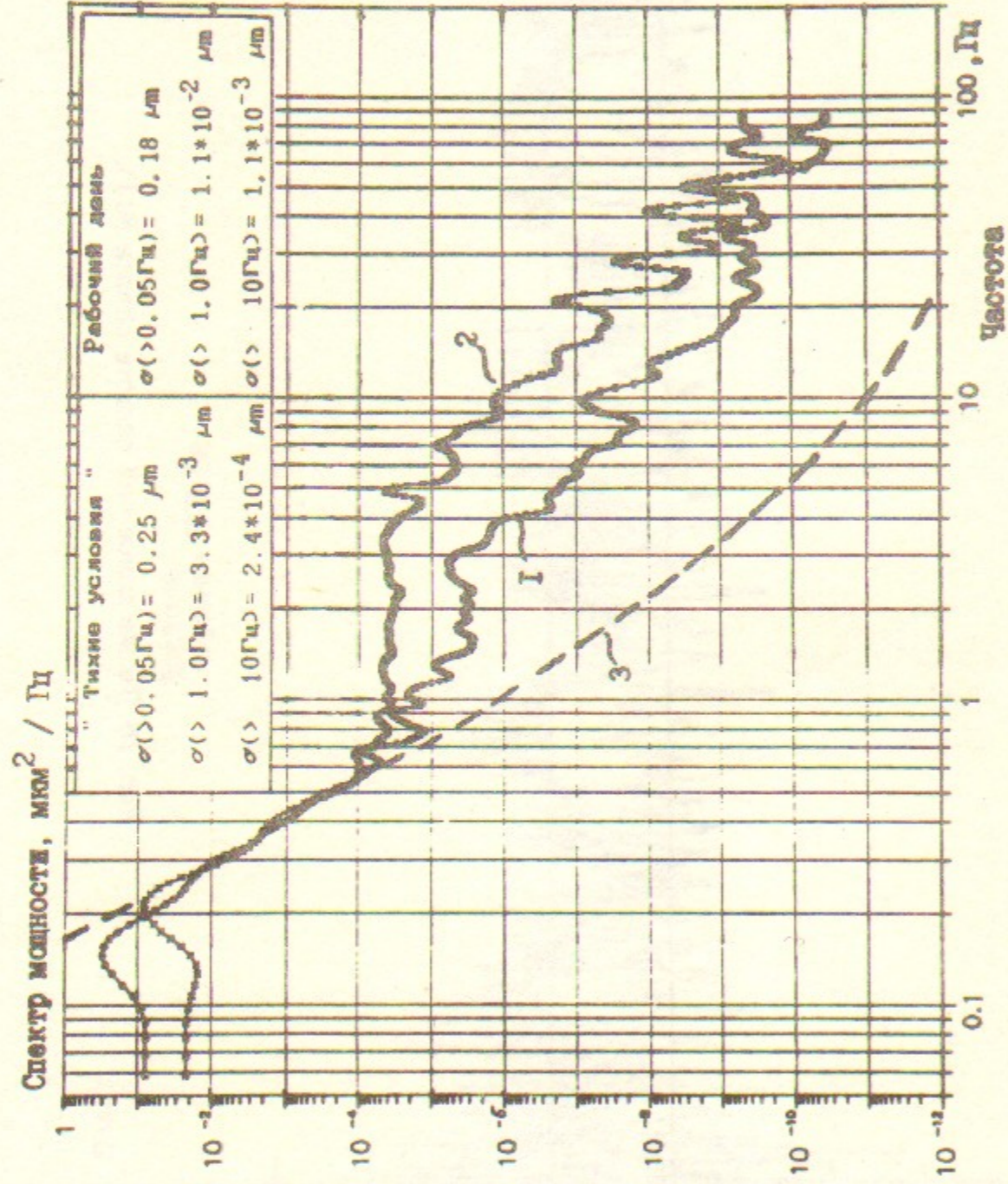


Рис. 2. Спектры мощности по вертикали в зависимости от частоты:
 1 — наши измерения в тихих условиях; 2 — наши измерения в условиях рабочего дня; 3 — измерения в тихих условиях из работы [7].

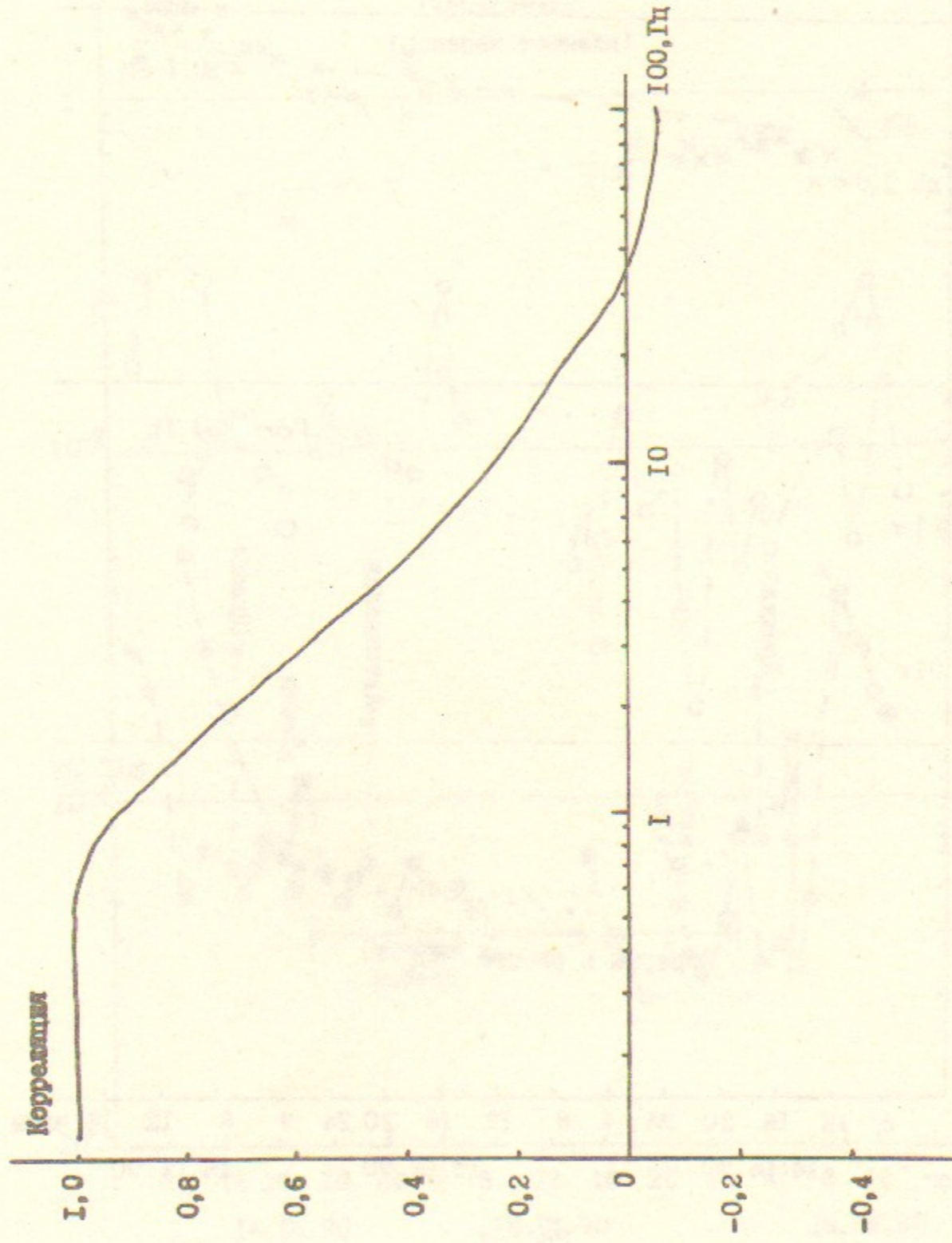


Рис. 3. Корреляция колебаний датчика в тоннеле и на поверхности земли в зависимости от частоты. Расстояние между датчиками 35 м.

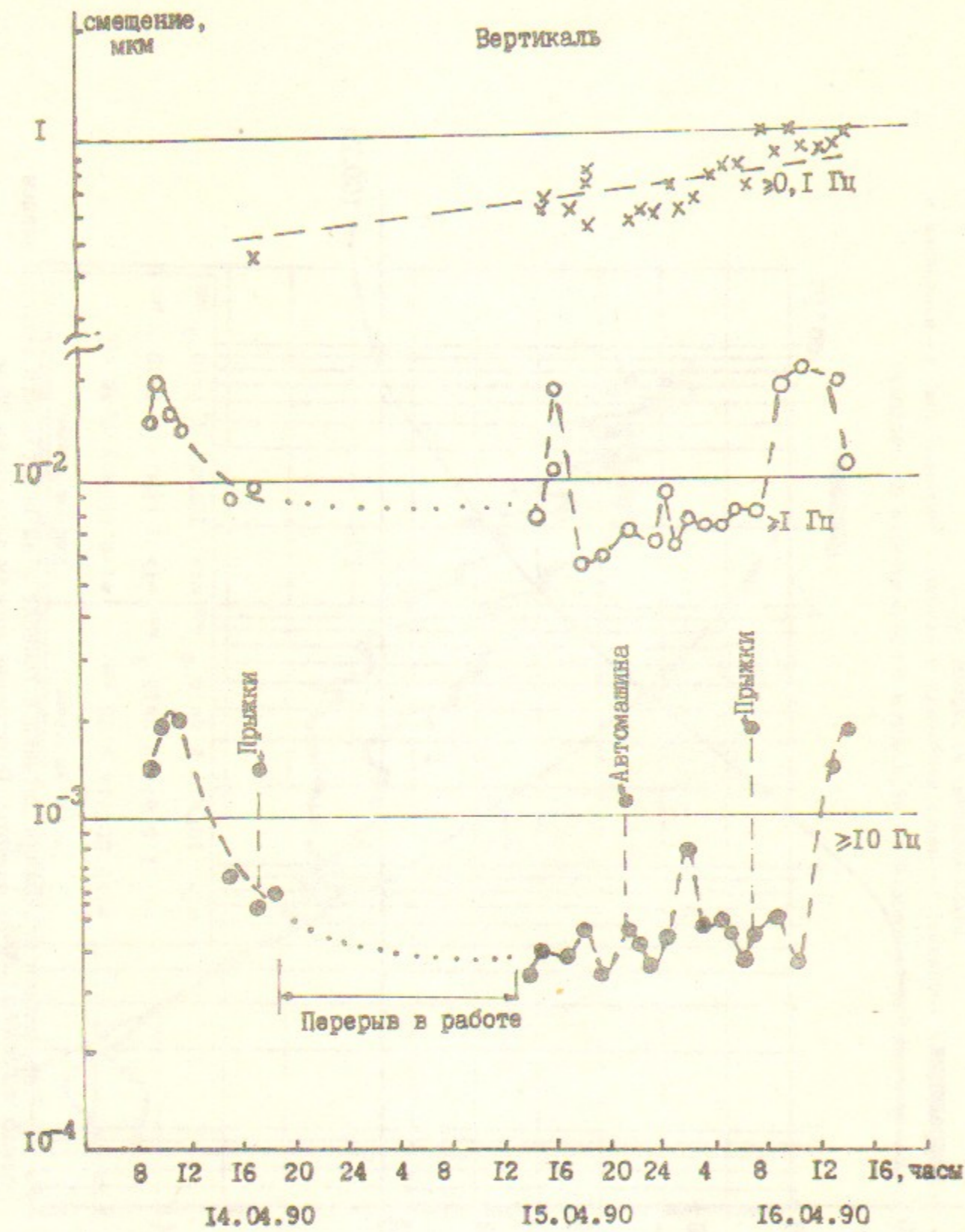


Рис. 4а.

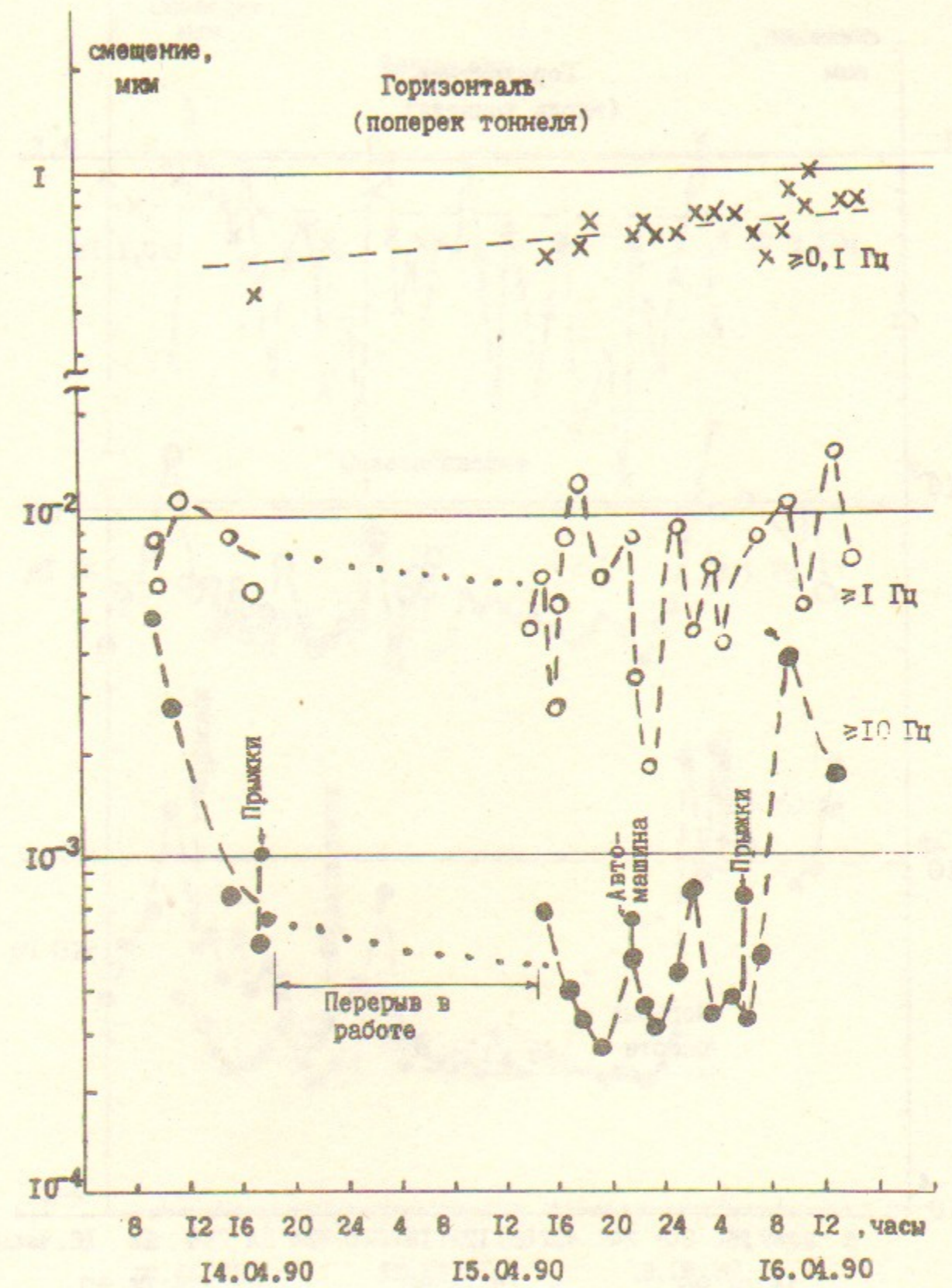


Рис. 4б.

Рис. 4. Зависимость среднеквадратичных смещений от времени в весенних измерениях:

а — вертикаль; б — вдоль тоннеля; в — поперек тоннеля.

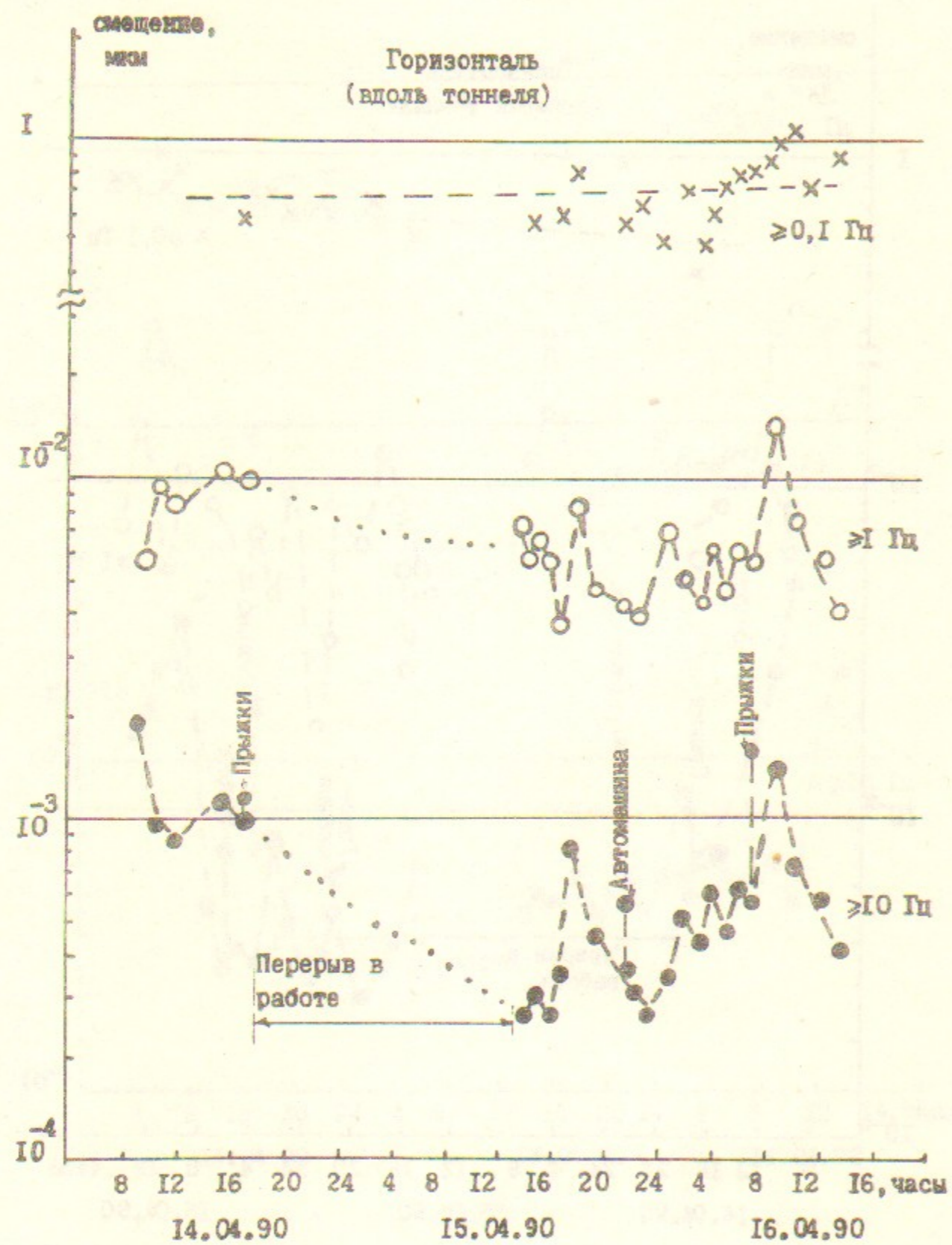


Рис. 4в

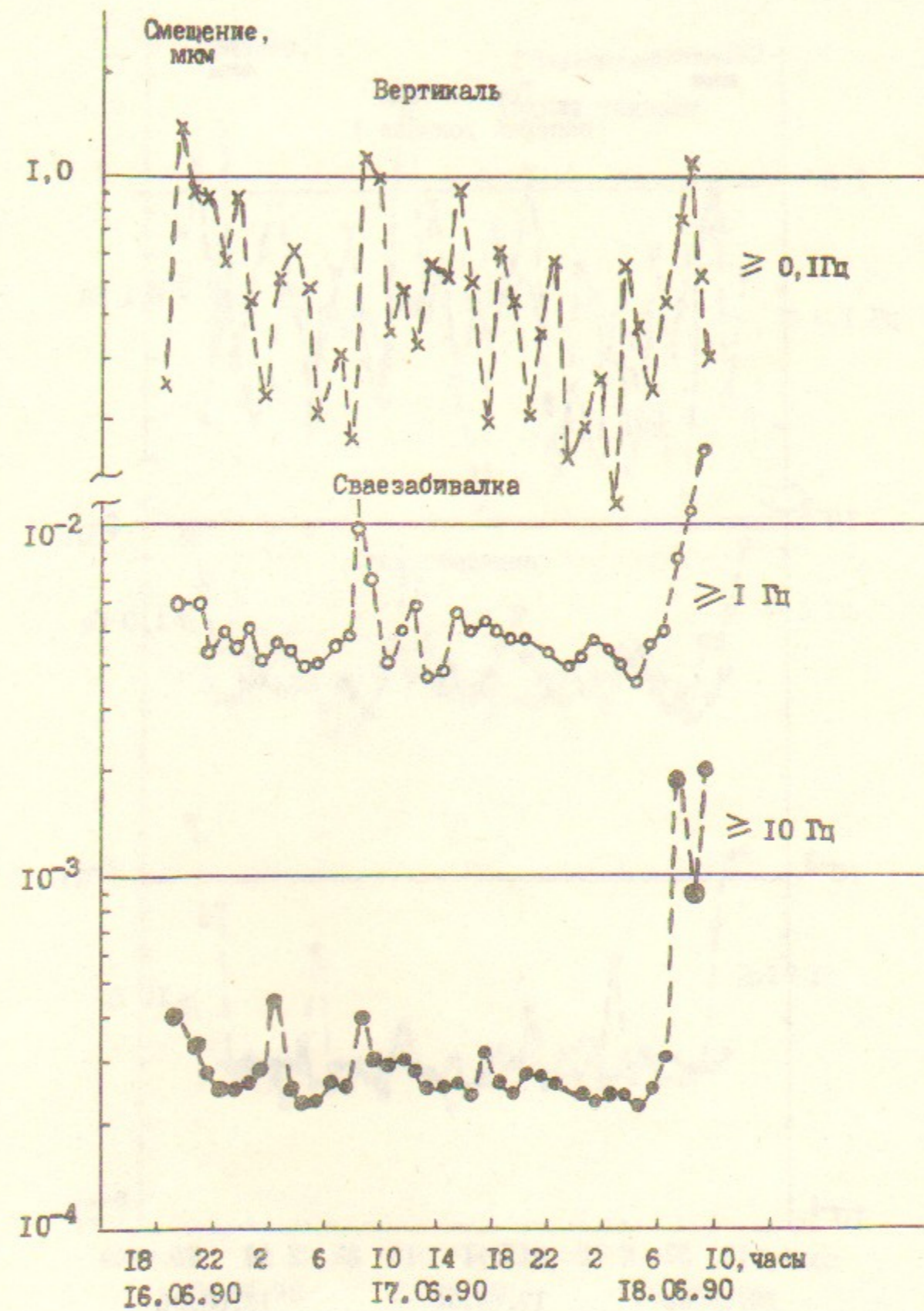


Рис. 5а.

Рис. 5. То же, что на рис. 4 для измерений летом.

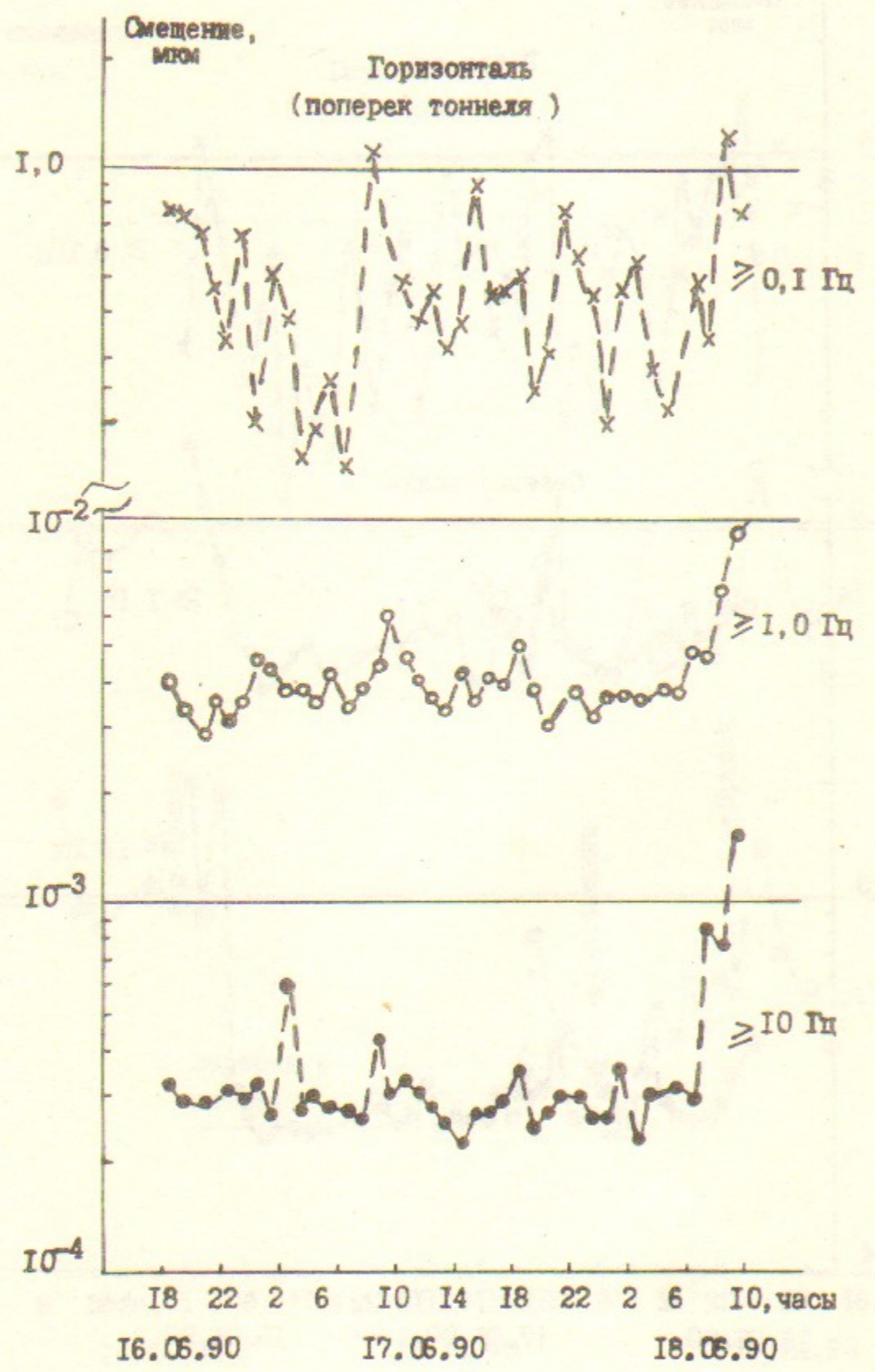


Рис. 5б.

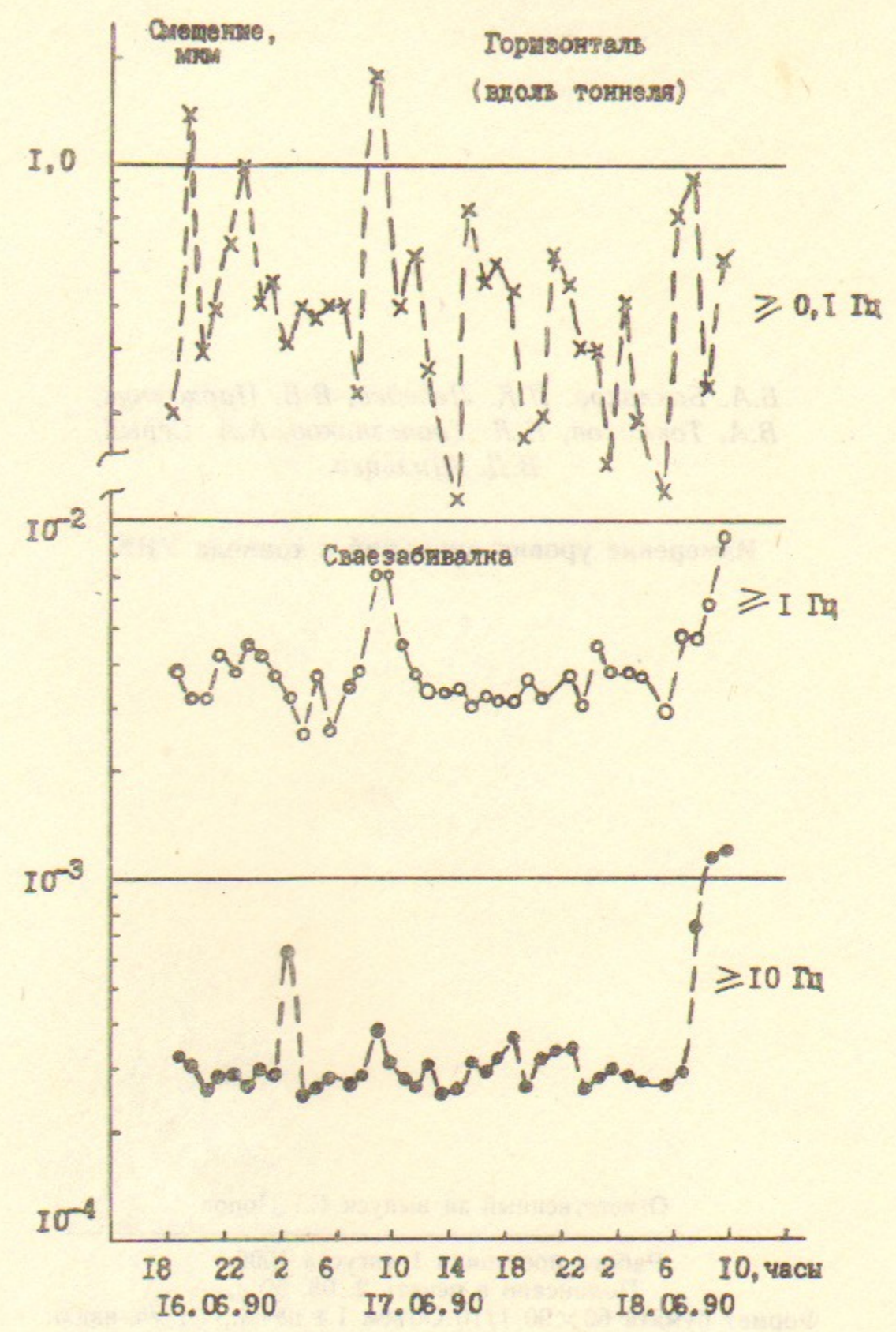
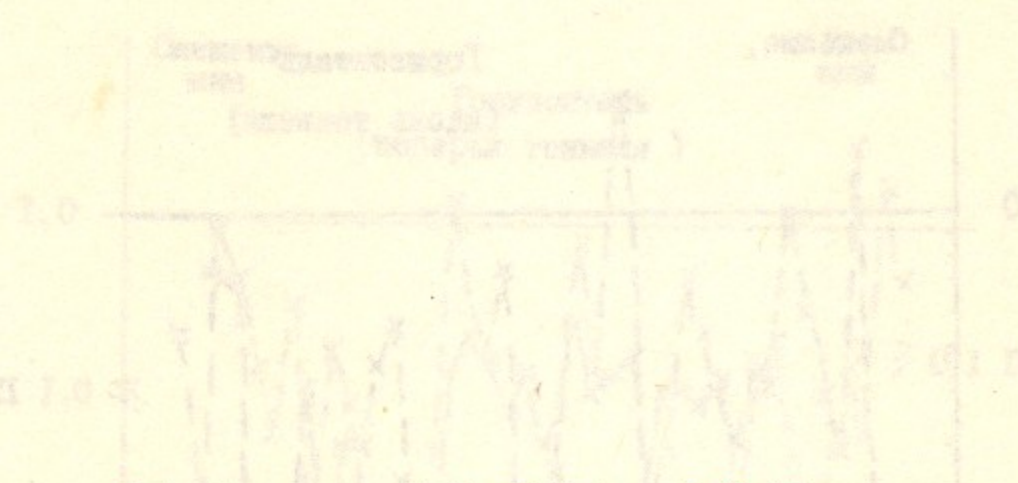
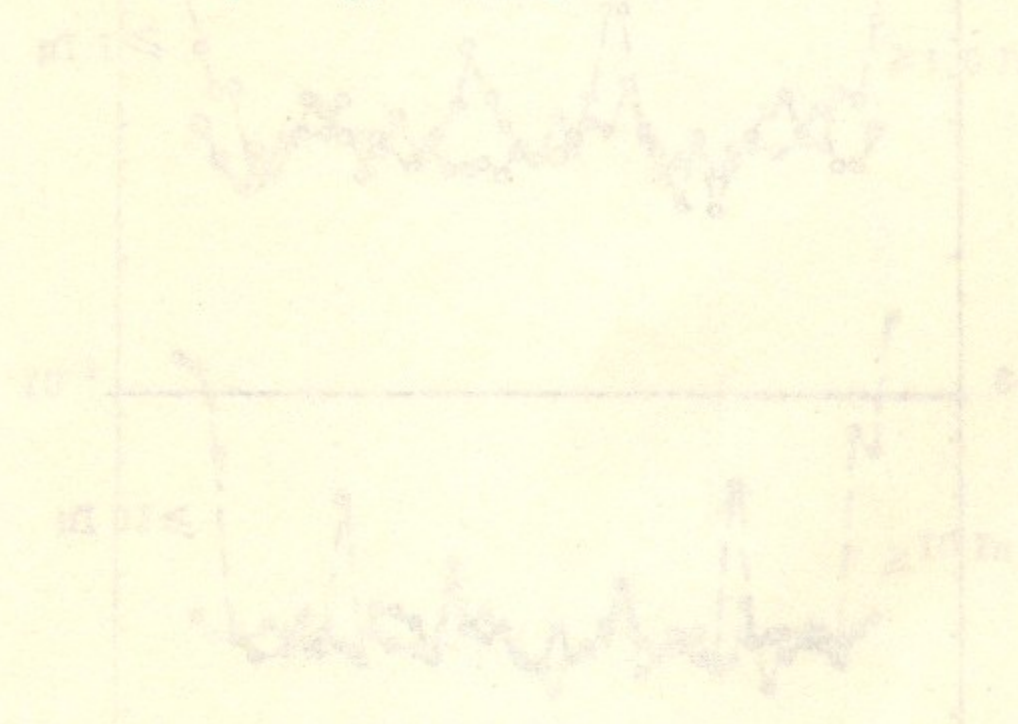


Рис. 5в



*Б.А. Баклаков, П.К. Лебедев, В.В. Пархомчук,
В.А. Токмаков, Н.Л. Трапезников, А.А. Серый,
В.Д. Шильцев*

Измерение уровня вибраций в тоннеле УНК



Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 1 августа 1990 г.
Подписано в печать 2. 08. 90 г.
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.4 печ.л., 1.1 уч.-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 88

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*