

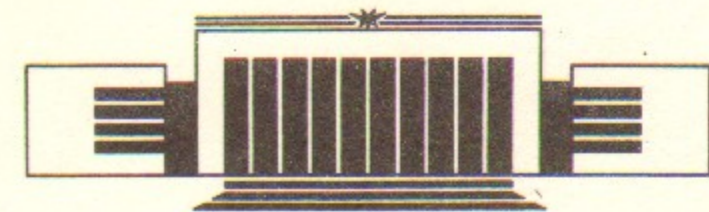


19
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

И.П. Долбня, Г.А. Корнюхин, Н.А. Мезенцев,
М.А. Шеромов, В.А. Шкаруба

**МЕТОД ПРЕЦИЗИОННОГО
ИЗМЕРЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ГОНИОМЕТРОВ ДЛЯ СИ**

ПРЕПРИНТ 87-128



НОВОСИБИРСК

Метод прецизионного измерения
погрешностей гониометров для СИ

И.П. Долбня, Г.А. Корнюхин, Н.А. Мезенцев,
М.А. Шеромов, В.А. Шкаруба

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

Многие задачи, связанные с использованием синхротронного излучения требуют создания механизмов и устройств, обеспечивающих высокую точность линейных и угловых перемещений, а также стабильность работы в широком диапазоне перестройки. Одними из таких устройств являются гониометры, применяемые для работы в составе монохроматоров рентгеновского излучения. Целью данной работы являлось исследование параметров и возможности использования гониометра в качестве монохроматора с высоким энергетическим разрешением для EXAFS-спектроскопии, рентгеновской микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и т. д.

Рассмотрим требования, которым должен удовлетворять гониометр для использования его в качестве монохроматора для EXAFS-спектроскопии. Область EXAFS в спектре выбранного элемента лежит вблизи K -края поглощения данного элемента и имеет ширину 1 кэВ. Для получения EXAFS-спектров необходимо производить сканирование по энергиям с интервалом $0.5 \div 2$ эВ. Энергии K -краев, на которых возможен EXAFS, лежат в диапазоне от 500 эВ до 25 кэВ [1]. Нас интересует величина η/E_k , где E_k — энергия K -края. Возьмем представляющую наибольший интерес область энергий от 10 до 20 кэВ, где это отношение мало. Тогда предельное значение отношения $\eta/E_k \sim 2,5 \cdot 10^{-5}$. Эта величина очевидным образом должна быть сравнима с отношением $\Delta\lambda/\lambda$, даваемым монохроматором, которое в свою очередь связано с углом формулой: $\Delta\lambda/\lambda \sim \text{ctg}\theta_B \cdot \Delta\theta$, где θ_B — угол Брэгга. Если использовать традиционную симметричную схему двухкристального монохроматора с кристаллами из Ge^{111} и выбрать значение энергии

кванта $E \sim 20$ кэВ, то $\theta_v \sim 5,4^\circ$ и соответствующее изменение $\Delta\theta$ составит $\sim (3 \cdot 10^{-6}$ рад ($\sim 0'',5$). Следовательно, необходимы гониометры, которые за один шаг шагового двигателя (ШД) поворачивают кристалл на $\Delta\theta$ с точностью 5—10% в достаточно широком диапазоне углов, или, что то же самое, в широком интервале шагов. Такой гониометр был разработан и изготовлен в ИЯФ СО АН СССР. Принцип его работы изображен на рис. 1. На вал ШД фирмы «Microcontrol» насажена шестерня 1, которая через разрезную подпружиненную шестерню 2 передает вращение червячной паре. На оси червячного колеса 3 устанавливается кристалл-монокристалл. Один шаг ШД соответствует углу $\sim 0'',17$. Следовательно, при общем коэффициенте передачи двигатель-вал 1:1500, вал гониометра поворачивается на $\sim 0'',4$ за один шаг ШД. Существующие методы измерения угла для детальной проверки характеристик изготовленного гониометра не годятся. Например, точность автоколлиматора АК-0,5У составляет всего 1". К тому же провести необходимые измерения в большом диапазоне углов невозможно. Поэтому был предложен и осуществлен автоматизированный метод измерения угла поворота. Основная идея предлагаемой методики состоит в следующем (рис. 2). Луч лазера, сфокусированный линзой, падает на одно из двух чуть распараллеленных зеркал и, испытывая ряд последовательных отражений, выходит из пространства между зеркалами, попадая на фотоприемник. При повороте одного из зеркал, стоящего на оси гониометра, меняется угол раствора зеркал и луч на фотоприемнике смещается.

В работе использовались зеркала с серебряным покрытием (коэффициент отражения $\sim 0,96$) длиной ~ 60 мм, которые позволяли работать с 30—35 отражениями на каждом зеркале, линза с фокусным расстоянием $f = 60$ см, в качестве источника использовался гелий-неоновый лазер. Фотоприемником служил линейный формирователь видеосигнала (ЛФВС) типа 1200ЦЛ1, представляющего собой серийный кремневый ПЗС с поверхностным каналом, поликремниевой системой электродов и подложкой n -типа, содержащий 1024 ячейки размером 15×15 мкм. Времена накопления составляли обычно 28—40 мс и позволяли работать с таким пятном. Устройство управления ПЗС и измерения видеосигнала, АЦП, с помощью которого проводилась оцифровка сигнала (АЦП101S) разработаны в ИЯФ и выполнены в стандарте КАМАК [2]. Типичные форма и размеры светового пятна за вычетом фона показаны на рис. 3. Управление аппаратурой, сбор информации, ее предварительная и последующая обработка осуществлялась на микро-ЭВМ

«Одренок» [3]. Предварительная обработка информации заключалась в нахождении смещений пятна, вычислении среднеквадратичного отклонения от среднего и выводе последовательной части информации на цветной растровый дисплей ЦДР-2. Таким образом имелась возможность оперативного контроля над поступающей информацией. На рис. 4 приведен пример контрольного файла для определенного момента времени. Точки на экране дисплея отмечают положение пятна после отработки одного шага. Положение светового пятна определялось по центру тяжести, вычисляемому по выделенному окну, например, от 400 до 911 ячейки ПЗС, при этом предварительно находился канал, который соответствовал максимуму сигнала, выделялось окно ± 128 ячеек от максимального канала, вычитался фон, определяемый по крайним левым и правым 16 каналам выделенного окна, и далее находился центр тяжести пятна. На каждом шаге вычислялось смещение пятна, т. е. величина: $\Delta_i = u_i - u_{i-1}$, где u_i — положение пятна на i -м шаге, да-

лее вычислялось среднее смещение: $\langle \Delta \rangle = \frac{\sum (u_i - u_{i-1})}{i}$ и средне-

квадратичное отклонение от среднего: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i - \langle \Delta \rangle)^2}{i-1}}$, значения

$\langle \Delta \rangle$, Δ_i и σ записывались в файл.

Для получения аналитического выражения, связывающего смещение луча на ПЗС, и поворота гониометра используются дополнительные геометрические построения (рис. 5). Пусть луч падает на плоскость второго зеркала под некоторым углом α к перпендикуляру и расстояние между зеркалами в месте входа луча $AP = d$. Продолжим плоскости зеркал, имеющие между собой угол β до пересечения друг с другом (точка O') и последовательно отразим луч $O'O$ относительно $O'O_1$, затем $O'O_1$ относительно $O'O_2$ и т. д. Из рисунка видно, что точки (B_1, B_2, \dots, B_n) соответствуют точкам отражения на зеркалах (A_1, A_2, \dots, A_n) , и в этом случае геометрический путь луча между двумя зеркалами соответствует отрезку AB_n . Пусть плоскость ПЗС параллельна первому зеркалу и находится на расстоянии D от него, что соответствует прямой CE . Проекция траектории луча от входа (точка A) до падения на ПЗС

$$L = (O'G - O'F) + GB_n + KL = \frac{d}{\operatorname{tg} \beta \cdot \cos n\beta} - \frac{d}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{d \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} n\beta}{\sin \beta \cdot \cos(\alpha + n\beta)} + D \operatorname{tg}(\alpha + n\beta). \quad (1)$$

Разложим тригонометрические функции в ряды Тейлора, ограничиваясь необходимыми членами разложения, и учтем, что $n\beta \gg \alpha$, так как $n \gg 1$:

$$L = \frac{dn^2\beta}{2} + d\alpha n + D\beta n + \frac{dn^2}{2}\beta \frac{5}{12}n^2\beta^2 + d\alpha n \frac{5}{6}n^2\beta^2 + Dn\beta \cdot \frac{n^2\beta^2}{3}. \quad (2)$$

Тогда смещение пятна на ПЗС при изменении угла β на $\Delta\beta$:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \left(\frac{dn^2}{2} + Dn\right)\Delta\beta + \left(\frac{5}{8}n^4\beta^2d + \frac{5}{3}d\alpha n^3\beta + Dn^3\beta^2\right)\Delta\beta = \\ &= \Delta L_{\text{лин}} \cdot \Delta\beta + \Delta L_{\text{нел}} \cdot \Delta\beta. \end{aligned} \quad (3)$$

Видно, что при $\beta \rightarrow 0$ (параллельные зеркала) зависимость между $\Delta\beta$ и ΔL линейная. Максимально допустимую непараллельность зеркал, определяемую необходимой точностью измерений, найдем из неравенства:

$$\frac{\Delta L_{\text{нел}}}{\Delta L_{\text{лин}}} \left(\frac{dn^2}{2} + Dn\right) \geq \left(n^3\beta \left(\frac{5}{8}dn\beta + \frac{5}{3}d\alpha + D\beta\right)\right), \quad (4)$$

где $\frac{\Delta L_{\text{нел}}}{\Delta L_{\text{лин}}}$ — допустимое отклонение от линейности, например, при

$\frac{\Delta L_{\text{нел}}}{\Delta L_{\text{лин}}} = 10^{-1}$ и $n=60$, $D=26$ см, $d=5$ мм, $\alpha=3^\circ$ соответствующее $\beta_{\text{max}} \leq 0^\circ,32$. Следовательно, в процессе измерений непараллельность должна быть $\leq 0^\circ,35$, чтобы можно было пользоваться формулой

$$\Delta\beta = \frac{\Delta L}{\left(\frac{dn^2}{2} + Dn\right)}. \quad (5)$$

С целью исключить возможные уходы пятна из просматриваемой области ячеек ПЗС, в программе была предусмотрена автоподстройка под первоначальное положение пятна, с которого начались измерения, при этом тестировался верхний гониометр, его двигатель обрабатывал заданное число шагов ($8k$, где $k=1, 2, 3, \dots$). Исследуемый гониометр был закреплен на другом гониометре, который делал такое же количество шагов обратно, и им же осуществлялась подстройка под первоначальное положение пятна, по совпадению с точностью до 0.5 ячейки. Имелась также возможность работать без подстройки. Влияние люфта, неизбежно возник-

кавшего в системе, учитывалось в случае с подстройкой тем, что начальное и конечное смещения в цикле из $8k$ шагов игнорировались, т. е. в эти моменты делался холостой ход. В случае без подстройки люфт просто выбирался двигателями. Проведенный частотный анализ показал, что таким образом можно избежать появления нежелательных пространственных гармоник, связанных с возникновением люфта. На рис. 6 показаны спектры для 256 последовательных элементов файла, соответствующих $256k$ шагам. Описанная методика обрабатывалась при различных значениях параметров d, D, n . На рис. 7, в частности, представлены результаты измерений для $d=6$ мм, $D=26,5$ см, $n=64$ в виде графика зависимости смещения пятна (Δ_i) от числа отработанных шагов. Соответственно, для выбранного интервала отработанных шагов можно вычислить значения $\langle \Delta \rangle$ (на рисунке обозначено как $\langle D \rangle$), σ , а также максимальное (max) и минимальное (min) значения смещений пятна. Аналогичные измерения (с той же программой) проводились при выключенном питании двигателей с целью нахождения случайной ошибки, связанной с внешними источниками механических помех, колебаниями падающего светового потока, колебаниями тока термогенерации носителей в ячейках ПЗС и т. д. Полученное смещение $\sim 7,8$ ячейки ПЗС хорошо согласуется со значением, рассчитанным по формуле (5) с $\Delta\beta = 2 \cdot 10^{-6}$ на шаг ШД. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о величине дифференциальной и интегральной нелинейностей по углу сканирования исследуемого гониометра. Дифференциальная нелинейность по результатам нескольких серий измерений с учетом случайной ошибки составила: $\frac{\sigma}{\langle \Delta \rangle} = 12 \div 14\%$ (для $k=2$), и интегральная

нелинейность, как величина $\frac{\Delta_{\text{max}} - \langle \Delta \rangle}{\langle \Delta \rangle}$, где Δ_{max} — максимальное значение смещения, получается равной $\sim 75\%$. Видно, что для того, чтобы работать с гарантированной точностью шага не хуже 5—7%, необходимо делать 4 шага, что соответствует углу $\sim 1'',6$. Следовательно, исследуемый гониометр по своим параметрам позволяет использовать его в качестве монохроматора для EXAFS-спектроскопии и даже в коротковолновой (до 16 кэВ) области K -краев, где $\Delta\theta > 1'',6$. Очевидно, что описанная в работе методика может успешно применяться и для измерения предельно малых углов ($\sim 5 \cdot 10^{-2}$ угловой секунды) при использовании большого числа отражений (~ 150). Для этого лишь необходимы зер-

кала достаточной длины (~ 15 см) с высоким коэффициентом отражения ($\sim 0,99$), хотя при этом ужесточаются ограничения на непараллельность зеркал. Еще одно преимущество данной методики заключается в резком уменьшении времени, затрачиваемого на измерения. Например, потребовалось 1,5 часа, для того чтобы повернуть гониометр на 16000 шагов, что соответствует повороту на $2^{\circ},05$.

В заключение авторы выражают благодарность К.В. Золотареву и С.Г. Курыло за полезные дискуссии в процессе работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев А.Л. и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-25. Новосибирск, (1983).
2. Блоки, выполненные в стандарте КАМАК. Информационный материал. Новосибирск, 1985. 82 с. — (Препринт/ИЯФ СО АН СССР: 80-194)
3. Пискунов Г.С., Тарарышкин С.В. Двадцатичетырехразрядная ЭВМ в стандарте КАМАК. — Автометрия, 1986, с. 32—38.

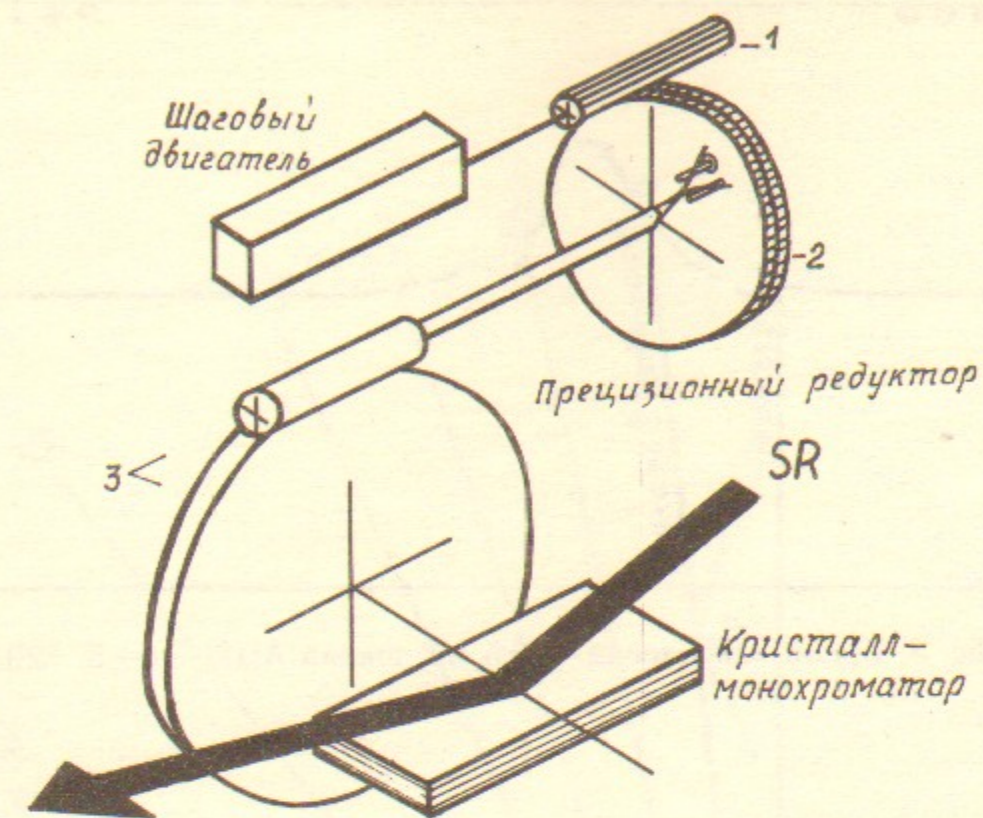


Рис. 1. Конструкция гониометра:
1 — шестерня; 2 — разрезанная подпружиненная шестерня; 3 — червячная пара.

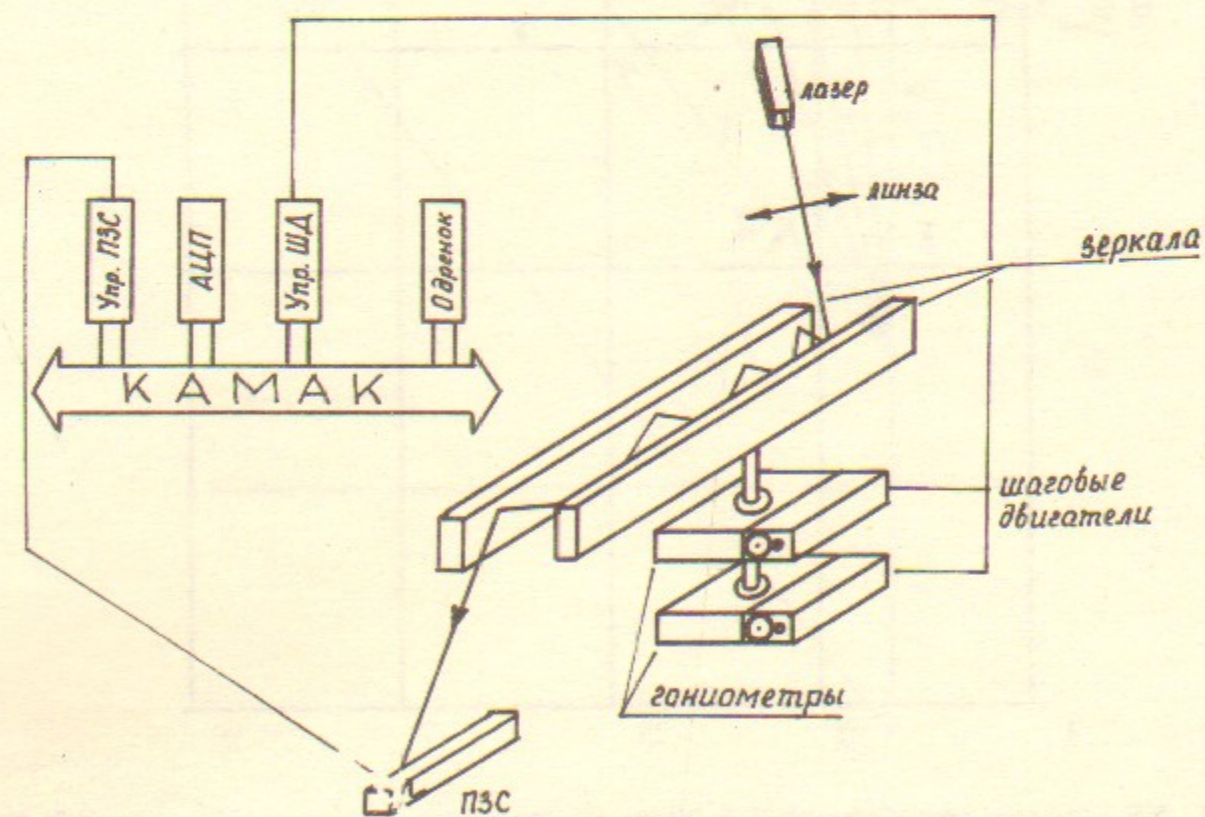


Рис. 2. Схема эксперимента.

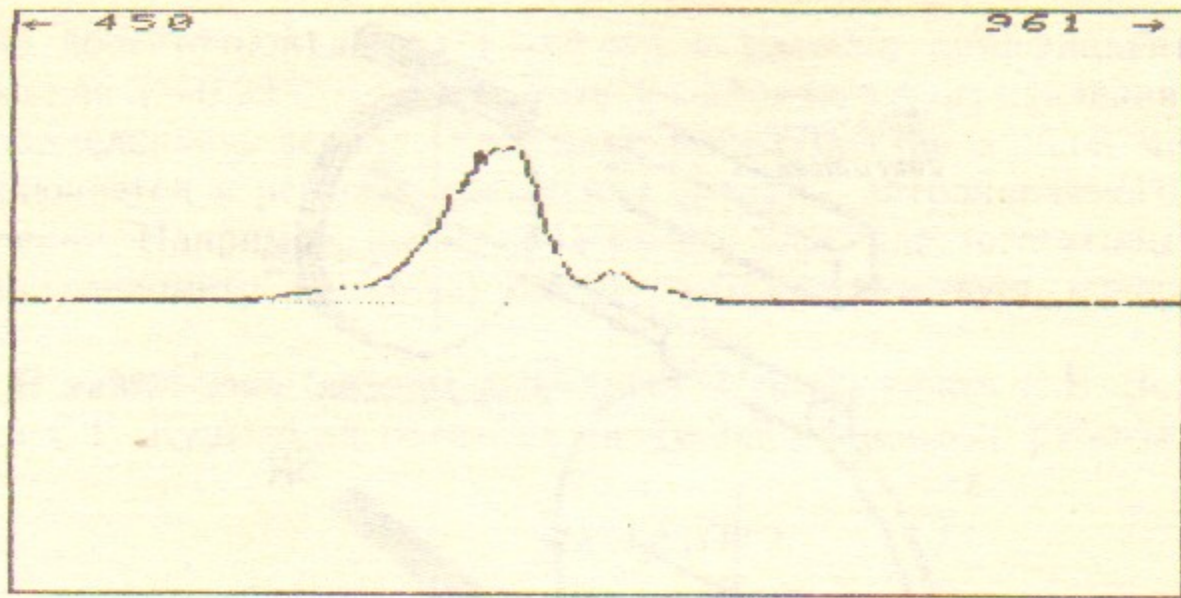


Рис. 3. Время накопления — 38,5 мс; шкала АЦП — (± 5 , 12В).

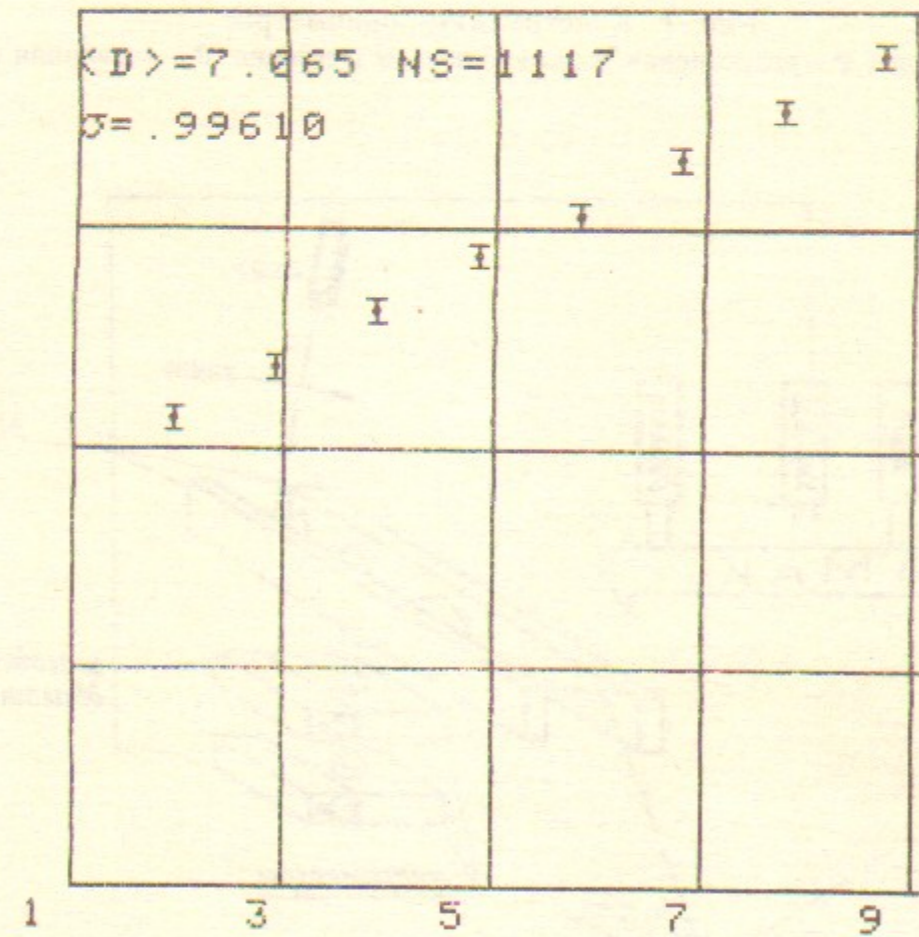


Рис. 4. NS — число, отработанных к данному моменту шагов; $\langle D \rangle$ — среднее смещение (в ячейках ПЗС); σ — среднеквадратичное отклонение от среднего.

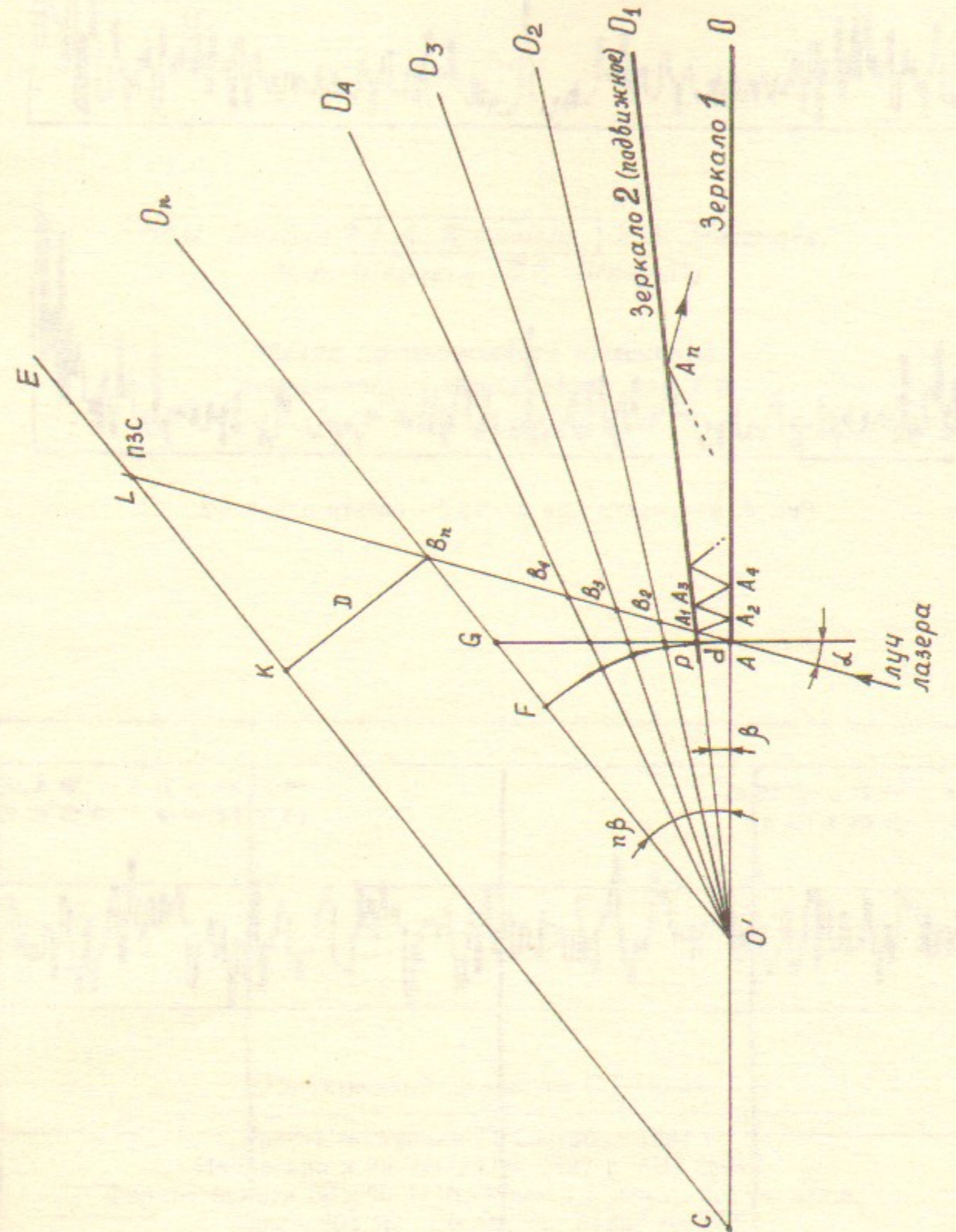


Рис. 5.

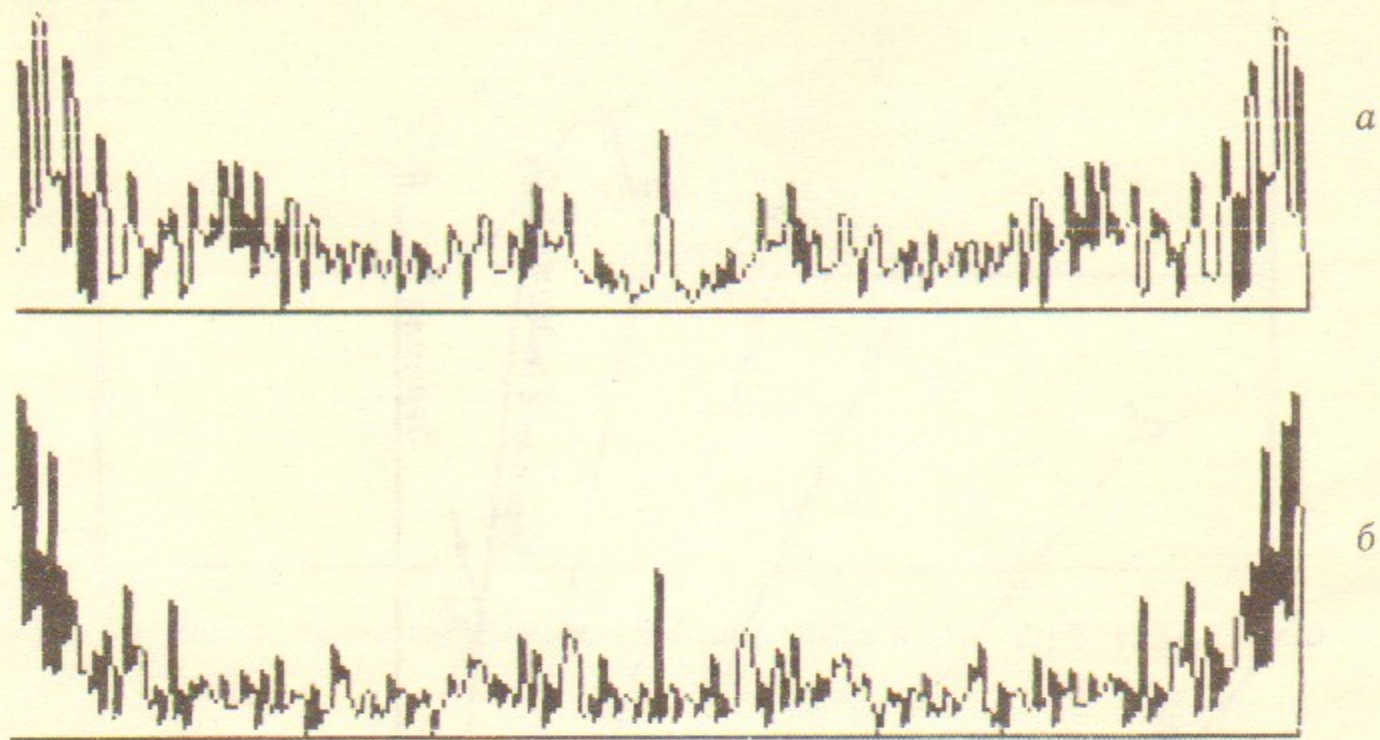


Рис. 6. а—спектр для $k=1$; б—спектр для $k=2$.

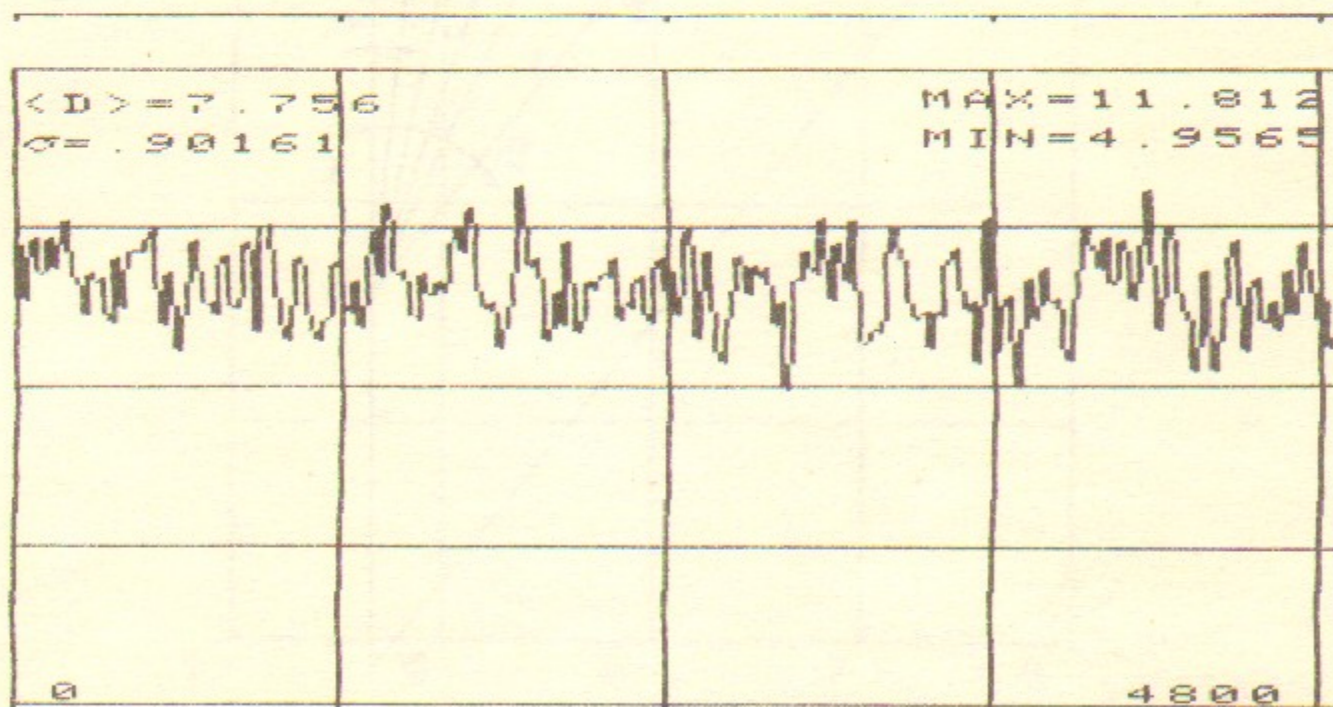


Рис. 7.

И.П. Долбня, Г.А. Корнюхин, Н.А. Мезенцев,
М.А. Шеромов, В.А. Шкаруба

Метод прецизионного измерения
погрешностей гониометров для СИ

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 17 сентября 1987 г.
Подписано в печать 22.09. 1987 г. МН 08397.
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,1 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.
Тираж 200 экз. Бескл. но. Заказ № 128

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