



Д.46

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Г.И.Димов, А.П.Зенков, П.Б.Лысянский,  
В.Г.Соколов, И.Я.Тимошин

ЮСТИРОВКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ  
УСТАНОВКИ «АМБАЛ»

ПРЕПРИНТ 84-81



НОВОСИБИРСК

## ЮСТИРОВКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ "АМБАЛ"

Г.И.Димов, А.П.Зенков, П.Б.Лысянский, В.Г.Соколов  
И.Я.Тимошин

### АННОТАЦИЯ

Дефекты изготовления и неточности выставки элементов магнитной системы амбиполярной ловушки могут приводить к дополнительным потерям плазмы. Оценки показывают, что в установке "АМБАЛ" необходимы миллиметровые допуски на выставку катушек с метровыми характерными размерами.

Для юстировки магнитной системы проведены измерения поперечных компонент магнитного поля вблизи оси установки с точностью  $3 \cdot 10^{-4}$  от величины продольного поля.

Среднеквадратичное отклонение силовых линий магнитного поля от расчетных рассматривается как критерий качества магнитной системы.

Необходимые для коррекции величины смещений элементов находятся с помощью решения некорректной обратной задачи.

Анализ результатов измерений показал наличие серьезного неустранимого дефекта изготовления (сдвиг катушек около 10 мм) в одном из неразборных блоков магнитной системы. Применение описанной методики позволило, тем не менее, найти такое расположение всех катушек, при котором отклонение силовых линий от расчетных не превышает 2 мм на всей длине установки.

### В в е д е н и е

Установка "Амбал" /1/ представляет собой плазменную амбиполярную ловушку открытого типа, состоящую из трех пробкотронов. Магнитные поля концевых пробкотронов создаются катушками типа "ИНЬ-ИНЬ", центрального - четырьмя круглыми соленоидами (Рис.1). Магнитные потоки пробкотронов согласуются двумя переходными системами, каждая из которых состоит из двух плоских и одной "С"-образной катушки. Все катушки соединены последовательно и рассчитаны на ток до 22 кА, при этом магнитное поле в пробках концевых пробкотронов достигает 30 кГс.

Небольшие дефекты изготовления и выставки магнитной системы амбиполярной ловушки могут привести к ощутимым возмущениям магнитного поля /2,3/. Возмущения магнитного поля усиливают поперечные потери плазмы. Допуски изготовления и конструктивные особенности (силовые каркасы, эпоксидная смола) магнитной системы ловушки "Амбал" не позволяют определить положение токовых шин с точностью лучше нескольких миллиметров. В то же время миллиметровые смещения некоторых элементов магнитной системы приводят к сантиметровым отклонениям силовых линий в области удержания плазмы. Поэтому в собранной по геометрическим размерам магнитной системе необходимо измерить реальное магнитное поле и затем произвести нужные коррекции.

Данная работа посвящена вопросам юстировки магнитной системы установки "Амбал". Изложение имеет следующий порядок.

В I разделе рассматриваются типы возмущений магнитного поля и вводится критерий качества магнитной системы. Во II части юстировка рассмотрена как обратная задача. Коррекция магнитного поля производится небольшими смещениями элементов магнитной системы. Исходными данными для нахождения величин этих смещений служат результаты измерений магнитного поля. Необходимый для этого комплекс программ для ЭВМ описан в III разделе. Описанию процедуры и изложению результатов юстировки посвящен IV раздел работы.

### 1. Критерий качества магнитной системы

В исходной схеме амбиполярной ловушки /4/ для обеспечения МГД устойчивости вводятся квадрупольные поперечные компоненты

магнитного поля. Такая аксиальная несимметрия приводит к сложной топологии поля (Рис.2) и конфигурации обмоток этой установки (Рис.1). При изготовлении и сборке магнитной системы неизбежны погрешности. Характерно, что даже незначительные дефекты могут существенно возмущать магнитное поле таких ловушек /2,3/. Таким образом, для сборки и встройки магнитной системы, кроме требований к точности, необходимо применение специальных методов контроля магнитного поля.

В идеальной магнитной системе ловушки "Амбал" магнитные поверхности (Рис.2) соединяют усредненные дрейфовые поверхности заряженных частиц всех трех пробкотронов. При этом силовые линии, проходящие через сечение дрейфовой поверхности в центральном пробкотроне (окружность) проходят через соответствующие сечения дрейфовых поверхностей в концевых пробкотронах. Возмущения магнитного поля могут нарушить согласование дрейфовых поверхностей частиц пробкотронов. При этом появляется дополнительная асимметрия распределения потенциала в плазме. Возникающие азимутальные компоненты электрического поля могут усиливать поперечный перенос. Кроме того, возмущения магнитного поля могут приводить к дополнительному неоклассическому переносу /3/.

Анализ возмущений магнитного поля удобно проводить, рассматривая отдельные гармоники мультипольного разложения поперечного магнитного поля. В идеальной магнитной системе отсутствуют поперечные дипольные компоненты поля. Дефекты реальной системы приводят к появлению дипольных составляющих магнитного поля и возмущению квадрупольной компоненты и высших мультипольных.

Дипольные возмущения магнитного поля приводят к тому, что сечения магнитных поверхностей плоскостями, перпендикулярными оси  $Z$ , не изменяя формы и размера, сдвигаются как целое по радиусу.

Квадрупольные и высшие мультипольные возмущения изменяют форму магнитных поверхностей, не сдвигая их по радиусу. Высшие мультипольные возмущения быстро убывают с уменьшением радиуса и в области удержания плазмы их влияние по сравнению с дипольными и квадрупольными возмущениями пренебрежимо мало.

Наиболее нежелательными являются дипольные возмущения, они действуют на весь плазменный шнур и могут привести к сильному рассогласованию дрейфовых поверхностей частиц пробкотронов. Кроме того, наличие дипольных возмущений затрудняет диагностику плазмы зондирующим пучком тяжелых частиц вдоль оси установки. Квадрупольные возмущения влияют в основном на периферии плазмы.

На численной модели магнитной системы установки "Амбал" было промоделировано влияние возможных неточностей изготовления и сборки. Для этого в идеальной модели делались сдвиги (повороты) катушек и вычислялась силовая осевая линия (СОЛ) — силовая линия, проходящая через точку  $X=Y=Z=0$ . Вычислялись также две периферийные линии, проходящие через точки  $Z=0, X=0, Y=30$  см и  $Z=0, X=30$  см,  $Y=0$  соответственно. СОЛ характеризует чисто дипольное возмущение магнитного поля; периферийные линии — суммарное влияние дипольного и квадрупольного возмущений. Результаты вычислений, приведенные в таблице I, показывают, что возможные возмущения квадрупольной компоненты в области удержания плазмы влияют значительно слабее дипольных возмущений. Сборка магнитной системы установки "Амбал" без предварительных измерений обеспечивает точность относительной выставки в несколько миллиметров, что вносит в основном дипольные возмущения.

В дальнейшем в данной работе рассматривается коррекция магнитного поля с точки зрения минимизации только дипольных возмущений. Магнитное поле в параксиальном приближении с учетом дипольных и квадрупольных членов имеет вид:

$$\begin{aligned} H_x(z) &= H_{x0}(z) + G_x(z) \cdot X \\ H_y(z) &= H_{y0}(z) + G_y(z) \cdot Y \\ H_z(z) &= H_{z0}(z) \end{aligned} \quad (I)$$

Величины с индексом "0" означают компоненты поля на оси  $Z$ .

Заметим, что в идеальной магнитной системе поперечные компоненты  $H_{x0}(z) = H_{y0}(z) = 0$  и СОЛ представляет собой прямую, совпадающую с осью  $Z$ . Поэтому естественно характеризовать магнитную систему величиной отклонения СОЛ от оси  $Z$ , и в качестве критерия принять среднеквадратичное отклонение СОЛ от оси  $Z$ .

## II. Юстировка как обратная задача

Магнитное поле установки можно, в принципе, корректировать включением специальных корректирующих обмоток, смещениями отдельных катушек магнитной системы, внесением в область поля материалов с  $\mu \gg 1$  и т.п. Юстировка магнитной системы установки "Амбал" производилась небольшими смещениями отдельных катушек.

Как отмечалось, отклонение СОЛ от оси  $Z$  характеризует дипольное возмущение магнитного поля, т.е. качество магнитной системы. Поэтому юстировка производилась следующим образом: по измеренному магнитному полю вычислялась СОЛ и находилось оптимальное расположение катушек, минимизирующее отклонение СОЛ от оси  $Z$ . Такая задача относится к классу обратных некорректных задач [5]. Основной физической причиной некорректности в данном случае является неоднозначность возможного набора положений элементов магнитной системы, дающих почти одинаковые (в пределах точности измерений) возмущения магнитного поля.

В параксиальном приближении компонента  $H_x$  не зависит от  $Y$ , а  $H_y$  от  $X$  см. (I), поэтому поля  $H_x$  и  $H_y$  и, соответственно,  $X$ -ую и  $Y$ -ую координаты силовой линии можно рассматривать независимо. Ниже для определенности всюду рассматриваются силовые линии в плоскости  $XZ$ .

Используя параксиальное разложение магнитного поля (I), получим уравнение силовой линии

$$\frac{dx}{dz} = \frac{H_{x0}(z) + G_x(z) \cdot x}{H_{z0}(z)} = A(z) + B(z) \cdot x \quad (2)$$

решение которого:

$$x(z) = e^{-c(z)} \left[ x_0 + \int_0^z dz' e^{c(z')} A(z') \right] \\ \text{где } c(z) = \int_0^z B(z') dz', \quad (3)$$

$x_0$  - начальная координата, для СОЛ  $x_0 = 0$ .

Следует заметить, что  $G_x(z)$  и величина продольного поля  $H_{z0}(z)$  слабо чувствительны к небольшим сдвигам катушек магнитной системы. Практически эти величины можно вычислить для идеальной магнитной системы (см. Рис. 2, 3) и единственной измеряемой величиной является поперечное поле на оси  $H_{x0}(z)$ .

Легко показать, что возмущение дипольных компонент магнитного поля линейно зависят от небольших смещений  $\delta_i$  (сдвигов, поворотов) элементов магнитной системы

$$\Delta H_{x0i}(z) = K(z) \cdot \delta_i \quad (4)$$

В силу линейности формул (3, 4) отклонение СОЛ  $X_i$  также линейно зависят от смещений  $\delta_i$ .

Силовая линия находится с помощью численного решения уравнения (2). Дипольное возмущение  $H_{x0}$  измеряется в  $n$  точках  $Z_i$  на оси установки. В этих же точках вычисляются коэффициенты  $A_i, B_i$  уравнения (2). При интегрировании уравнения силовой линии функции  $A(z)$  и  $B(z)$  линейно интерполируются в промежутках между точками  $Z_i$ . Отклонения СОЛ  $X_i$  удобно регистрировать в точках  $Z_i$  (практически удобно в качестве СОЛ рассматривать линию, проходящую через точку  $x=y=0, Z=300$  на внешнем торце концевой пробкотрона).

Для коррекции возмущений магнитного поля выбираются возможных смещений элементов магнитной системы. В силу линейности задачи вектор отклонений СОЛ от оси  $Z$   $\vec{d} = \{d_1, \dots, d_n\}$ ,  $d_i = x(Z_i)$  линейно зависит от смещений элементов  $\vec{\delta} = \{\delta_1, \dots, \delta_m\}$

$$A \vec{\delta} = \vec{d} \quad (5)$$

$A$  - матрица влияния выбранных  $m$  сдвигов на отклонения СОЛ в  $n$  точках. Элементы  $a_{ij}$  матрицы  $A$  находятся методом пробных возмущений. Для нахождения  $K$ -ой строки матрицы делается единичное  $K$ -ое смещение  $\vec{\delta}^K = \{0, 0, \dots, 1, \dots, 0\}$  и находятся  $n$  отклонений СОЛ  $\vec{d}^K$ . В принципе можно осуществлять пробные сдвиги катушек установки, однако это очень трудоемкая задача. Поэтому для ловушки "Амбал" пробные сдвиги осуществлялись на численной модели магнитной системы. В идеальной модели делались последовательно единичные смещения (вычислялись дипольные возмущения на оси в точках  $Z_i$  (имитация из-

мерений) и далее по описанной выше методике вычислялись отклонения СОЛ.

Решение линейной системы (5) обычно соответствует минимуму квадратичного функционала:

$$Q = \|A\vec{\delta} - \vec{d}\|^2 = \sum_i (\sum_j \alpha_{ij} \delta_j - d_i)^2 \quad (6)$$

Для решения некорректной задачи необходимо минимизировать регуляризирующий функционал, используя дополнительную информацию о решении. В данном случае естественно использовать тот факт, что возможные искажения формы катушек и погрешности их выставки невелики, и искать решение  $\vec{\delta}$  с минимальной нормой. Кроме того, необходимо учесть, что в реальной системе возможны искажения магнитного поля в областях, где коррекция затруднена по техническим причинам — например в концевых пробкотронах, которые выполнены в виде неразборных блоков. В этих областях надо ослабить требования на минимизацию невязки. Оба условия приводят к функционалу:

$$Q_{\alpha} = \|\beta(A\vec{\delta} - \vec{d})\|^2 + \|\alpha\vec{\delta}\|^2 \quad (7)$$

Здесь элементы  $\alpha_{ii}$  диагональной матрицы  $\alpha$  ограничивают в решении соответствующие смещения  $\delta_i$ , а элементы  $\beta_{jj}$  диагональной матрицы  $\beta$  придает различные веса невязкам в точках  $Z_j$ . Легко показать, что минимум функционала  $Q_{\alpha}$  достигается на решении линейной системы:

$$(A^T \beta A + \alpha) \vec{\delta} = A^T \beta \vec{d} \quad (8)$$

Знак "Т" означает транспонирование. Очевидно, система (5) является частным случаем (8) при  $\alpha_{ii} = 0$  и  $\beta_{jj} = 1$ .

Предлагаемая схема решения обратной задачи легко распространяется и на другие методы коррекции магнитного поля: с помощью внесения в область поля материалов с  $\mu \gg 1$ , включением дополнительных обмоток и т.д. Для этого необходимо расширить матрицу  $A$ , делая дополнительные пробные возмущения экспериментальным или расчетным путем.

### III. Измерение поперечных компонент магнитного поля. Математическое программное обеспечение калировки.

В присоединенной области амбиполярных ловушек  $H_z \gg H_x$  и  $H_z \gg H_y$ . В идеальной магнитной системе на оси  $H_x = H_y = 0$ . Для прецизионного измерения малых поперечных компонент магнитного поля при наличии большой продольной компоненты был изготовлен специальный прибор /6/, устройство которого схематически показано на рис.4. Кольцевой магнит 1 из самарий-кобальтового сплава на карданном подвесе 2 может свободно ориентироваться по внешнему полю. В центре магнита нормально его магнитному моменту закреплено зеркало 3. Вдоль оси установки направляется луч лазера, подсвечивающий зеркало. Угол между падающим лучом и отраженным равен двойному углу между осью и силовой линией, проходящей вблизи центра магнита. Измерение поперечных компонент магнитного поля производится компенсационным методом. Отраженный луч попадает на блок фотодиодов 5, сигналы с которых через усилители обратной связи подаются на компенсирующие катушки 6. Магнитное поле катушек компенсирует поперечные составляющие  $H_x$  и  $H_y$  исследуемого поля в области магнита, в результате чего зеркало устанавливается перпендикулярно лучу. При этом отраженный луч падает в центр блока фотодиодов. Поперечные компоненты измеряемого магнитного поля определяются величинами токов в компенсирующих катушках. Прибор обеспечивает угловую точность не хуже  $3 \cdot 10^{-4}$  радиана, что позволяет измерять поперечные составляющие магнитного поля от 0.015 до 20 Э при продольных полях 20+1000 Э.

Для проведения измерений вдоль оси ловушки был установлен направляющий рельс. По рельсу на каретке передвигался описанный выше прибор. Устройство каретки позволяет производить измерения как на оси установки, так и в присоединенной области  $r \leq 1$  см, не меняя установку рельса.

Погрешности измерений определяются собственными погрешностями прибора, точностью его установки на рельсе и качеством изготовления и выставкой рельса. Механизм каретки имеет нониус, позволяющий выставлять прибор относительно рельса по радиусу с точностью не хуже 0,2 мм и по углу вокруг оси  $Z$  с точностью  $1^{\circ}$ . Направляющий рельс состоит из двух секций и на всей длине

(более 6 метров) выставляется по оси с точностью не хуже 0,5 мм. Блок фотодиодов имеет погрешность выставки не более 0,2 мм и при измерениях минимальное расстояние между ним и прибором составляло 4 метра. Таким образом, суммарный эффект погрешностей выставки может привести к ошибке в измерении угла  $\alpha$  :

$$\Delta\alpha = \frac{0.2+0.5+0.2}{4 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{2} = 1.125 \cdot 10^{-4} \text{ рад} \quad (9)$$

Повороты компенсирующих катушек прибора вокруг продольной оси на угол  $\theta$  приводят к искажению измерений компонент  $H_x$  и  $H_y$  :

$$\begin{aligned} \tilde{H}_x &= H_x \cos \theta + H_y \sin \theta \\ \tilde{H}_y &= H_y \cos \theta - H_x \sin \theta \end{aligned} \quad (10)$$

Для величин  $H_x$  порядка  $H_y$  и углов  $\theta < 1^\circ$  ошибка не превышает 2%. Кроме того, минимизация величин  $\tilde{H}_x$  и  $\tilde{H}_y$  (в результате 2-3 итераций в процессе юстировки) практически эквивалентна минимизации компонент  $H_x$  и  $H_y$  и почти не влияет на результаты коррекции дипольных компонент.

Повороты компенсирующих катушек в плоскости  $XZ$  вокруг оси  $Y$  на угол  $\theta \ll 1$  раз дает квадратичную по углу погрешность

$$\tilde{H}_x = H_x (1 - \cos \theta) \approx H_x \frac{\theta^2}{2} \quad (11)$$

Измерения проводились на постоянном токе магнитной системы до 1500 А. При этом величина магнитного поля в центре установки не превышала 150 эрстед и при измерениях необходимо было учитывать влияние постоянного магнитного поля Земли и намагничение окружающих металлических конструкций. Ловушка "Амбал" рассчитана на импульсную работу (длительность импульса до 5 с) с током 15+22 кА в магнитной системе. Поэтому влиянием небольших постоянных полей в рабочем режиме можно пренебречь. Для исключения поперечных компонент постоянного внешнего магнитного поля при юстировке, измерения величины  $H_{\perp}(z)$  производились для двух значений тока  $I_1$  и  $I_2$  в магнитной системе. Тогда величина истинного (токового) магнитного поля :

$$H_{\perp} = \frac{I_1 H_{\perp 1} - I_2 H_{\perp 2}}{I_1 - I_2} \quad (12)$$

Для юстировки магнитной системы установки "Амбал" был разработан комплекс программ для ЭВМ: DIM3, MFM, MAG и MCS.

Программа DIM3 [7] использовалась для расчета характеристик магнитного поля установки - величины поля на оси  $H_0(z)$ , функций  $G(z)$  и, кроме того, для нахождения матрицы влияния  $A$ .

Программа MFM разработана для проведения измерений. С ее помощью величины токов компенсирующих катушек и ток системы, измеряемые цифровым интегрирующим вольтметром, вводятся в память ЭВМ, обрабатываются и запоминаются на магнитных дисках. Получаемые зависимости  $H_x(z)$  и  $H_y(z)$  контролируются визуально с помощью графического дисплея.

Программа MAG позволяет находить силовые линии  $X(z)$  и  $Y(z)$  в параксиальном приближении, используя результаты измерений. Величины  $X(z_i)$ ,  $Y(z_i)$  запоминаются на магнитных дисках для последующего их использования в программе MCS.

Вычисление необходимых корректирующих смещений элементов магнитной системы производится программой MCS. Требуемые для этого матрица влияния  $A$  и правая часть  $\vec{D}$  (смещения СОЛ в точках  $z_i$ ) считываются с магнитных дисков. Возможность оперативного изменения параметров  $\alpha_{ci}$  и  $\beta_{ji}$  (7) и наглядное отображение информации (силовые линии до и после коррекции) на экране цветного дисплея позволяет быстро находить оптимальные корректирующие смещения.

#### IV. Процедура юстировки и обсуждение результатов

Расположение элементов магнитной системы ловушки "Амбал" изображено на Рис. I. Ее юстировка проводилась в несколько этапов.

Вначале для проверки качества изготовления концевых пробкотронов в них были измерены продольное поле вдоль оси  $Z$  и поперечные поля вдоль осей  $X$  и  $Y$  измерителем магнитной

индукции III-I-8. Результаты приведены на Рис. 5. Согласно с расчетными значениями в пределах точности измерений (1,5%) указывает на отсутствие грубых нарушений обмоток концевых пробкотронов. Эти измерения позволили также установить центры концевых пробкотронов и нанести на их каркасах реперные метки. По меткам были выставлены вдоль оси  $Z$  концевые пробкотроны, а затем по геометрическим размерам остальные элементы магнитной системы. Измерение  $H_z$  вдоль оси всей системы также показало согласие с расчетами (в пределах точности измерений).

Далее по вышеописанной методике были определены параксиальные силовые линии в концевых пробкотронах. В северном пробкотроне и в плоскости  $YZ$  южного силовые линии близки к идеальным (Рис.6). Анализ силовых линий южного пробкотрона в плоскости  $XZ$  (Рис.7) показывает наличие дефекта изготовления. Решение обратной задачи показывает, что подобное возмущение может быть смоделировано смещением катушек ИНЬ-ЯНЬ относительно друг друга на 5 мм вдоль оси  $X$ . Для иллюстрации на Рис.8 приведены расчетные силовые линии в таком пробкотроне со смещением катушек.

На последнем этапе юстировались южная и северная половины магнитной системы в отдельности, и затем вся система в целом. При этом южный пробкотрон был поставлен в оптимальное положение со значительным поворотом вокруг оси  $Y$  на угол  $1/30$  рад. Кроме того, поскольку измерение магнитного поля в области южного пробкотрона с помощью других катушек практически невозможно (из-за малости их влияния), соответствующие коэффициенты  $\beta_{ij}$  при решении системы (8) были положены равным нулю.

Эффективность проведенной коррекции демонстрируется на Рис.(9,10), где показаны проекции СОЛ до и после юстировки. Отклонение СОЛ от оси  $Z$  на длине 600 см не превышает 2 мм. На рис.11 приведены углы наклона силовых линий на оси  $Z$  до и после коррекции.

Анализ результатов измерений, проведенных при разных токах магнитной системы, показал некоторое влияние нелинейных эффектов намагничивания каркасов катушек и металлических конструкций, изготовленных из нержавеющей стали. Как упоминалось выше, в рабочем режиме импульсный ток в магнитной системе

"Амбал" будет на порядок больше. Поэтому наименьшее намагничивание может дать небольшое, но непредсказуемое возмущение магнитного поля. К сожалению, прибор для измерения поперечных компонент магнитного поля /6/ для работы в импульсных режимах не предназначен. Поэтому на следующем этапе юстировки на номинальном токе магнитной системы предусмотрена трассировка силовых линий электронными пучками. Эта методика позволит не только учесть нелинейные эффекты намагничивания, но также уточнить влияние высших мультипольных добавок, возникающих на периферии плазмы.

В заключении авторы выражают благодарность В.С.Белкину, Ю.В.Коваленко и В.М.Карлинеру за помощь в наладке электронной аппаратуры и программного обеспечения ЭВМ, а также Н.А.Кукиль, И.Е.Лубягину и В.Дубровину за большой и кропотливый труд по механической выставке элементов магнитной системы и помощь в работе

## Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Димов, Г.В.Росляков. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 80-152, 1980.  
Г.И.Димов и др. Доклады II Всесоюзной конференции по инженерным проблемам ТЯР, Ленинград, 2, стр.46, 1981.
2. Hooper E.B. Preprint UCR4-86264, Lawrence Livermore Laboratory, 1981.
3. И.А.Котельников. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 83-36, 1983.
4. Г.И.Димов, В.В.Закайдаков, Н.Е.Кишиневский, Физика Плазмы, 2, 597 (1976).
5. А.Н.Тихонов, В.Я.Арсенин. Методы решения некорректных задач. М., "Наука" 1974.
6. В.С.Белкин и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 83-35, 1983.
7. П.Б.Лысянский, Б.М.Фомель. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 79-59, 1979.

Подписи к рисункам

- Рис.1. Магнитная система установки АМБАЛ.
- Рис.2. Распределение магнитного поля вдоль оси ловушки АМБАЛ. Магнитная поверхность, пересекающая медианную плоскость по окружности радиуса 30 см.
- Рис.3. График функции  $G_x^*(z) = G_x(z)/H_z(z)$   
 $G_y(z) = -G_x(-z)$ .
- Рис.4. Схема прибора для измерения малых поперечных компонент магнитного поля.
- Рис.5. Поперечные поля в концевых пробкотронах линии - расчетный вариант, точки - измеренные значения.
- Рис.6. Параксиальные силовые линии  
а) северный пробкотрон плоскость  $YZ$   
б) северный пробкотрон плоскость  $XZ$   
в) южный пробкотрон плоскость  $YZ$
- Рис.7. Параксиальные силовые линии в южном пробкотроне плоскость  $XZ$ .
- Рис.8. Параксиальные силовые линии численной модели пробкотрона со смещенными катушками.
- Рис.9. Проекция СОЛ до коррекции.
- Рис.10. Проекция СОЛ после коррекции.  
Обратить внимание на масштаб рисунков 9 и 10!
- Рис.11. Углы наклона силовых линий на оси до и после коррекции  
а) плоскость  $XZ$   
б) плоскость  $YZ$
- Рис.12. Таблица I. Координаты  $X$  и  $Y$  силовых линий в точках  $Z$ ; при различных смещениях катушек магнитной системы.



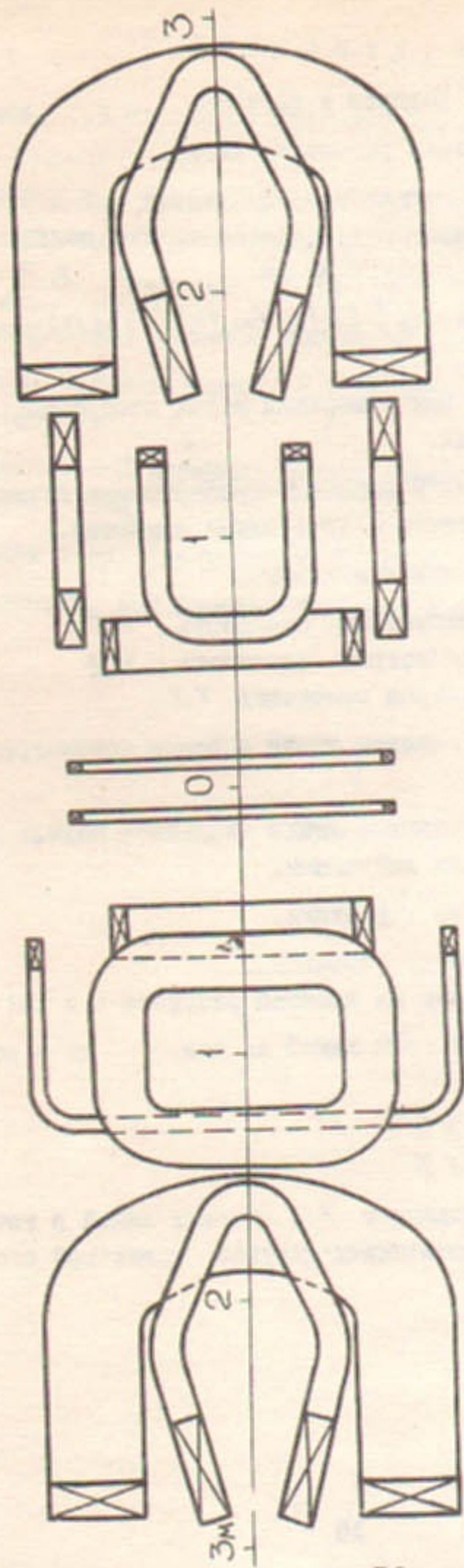


Рис. 1.

16

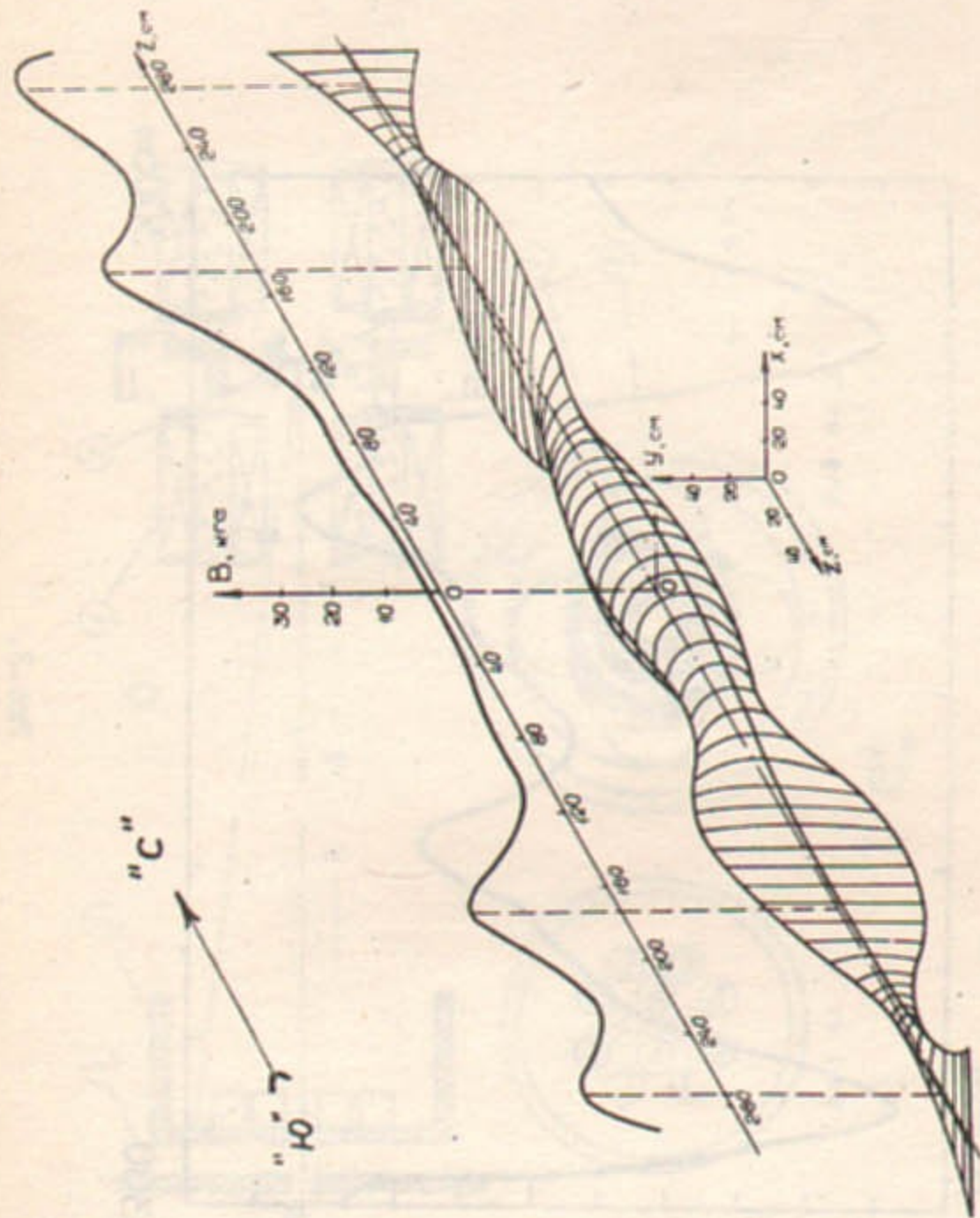


Рис. 2.

17

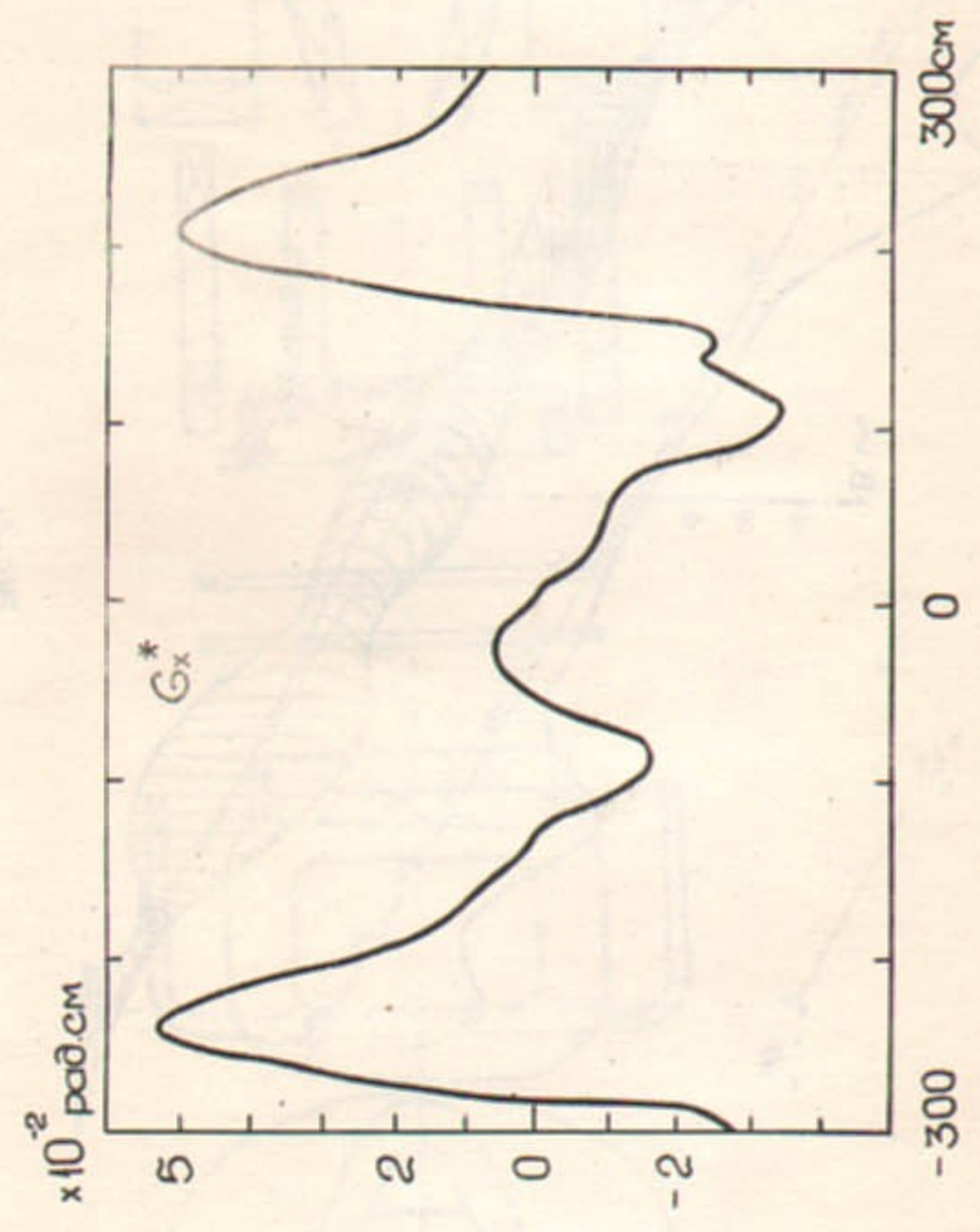


Рис.3.

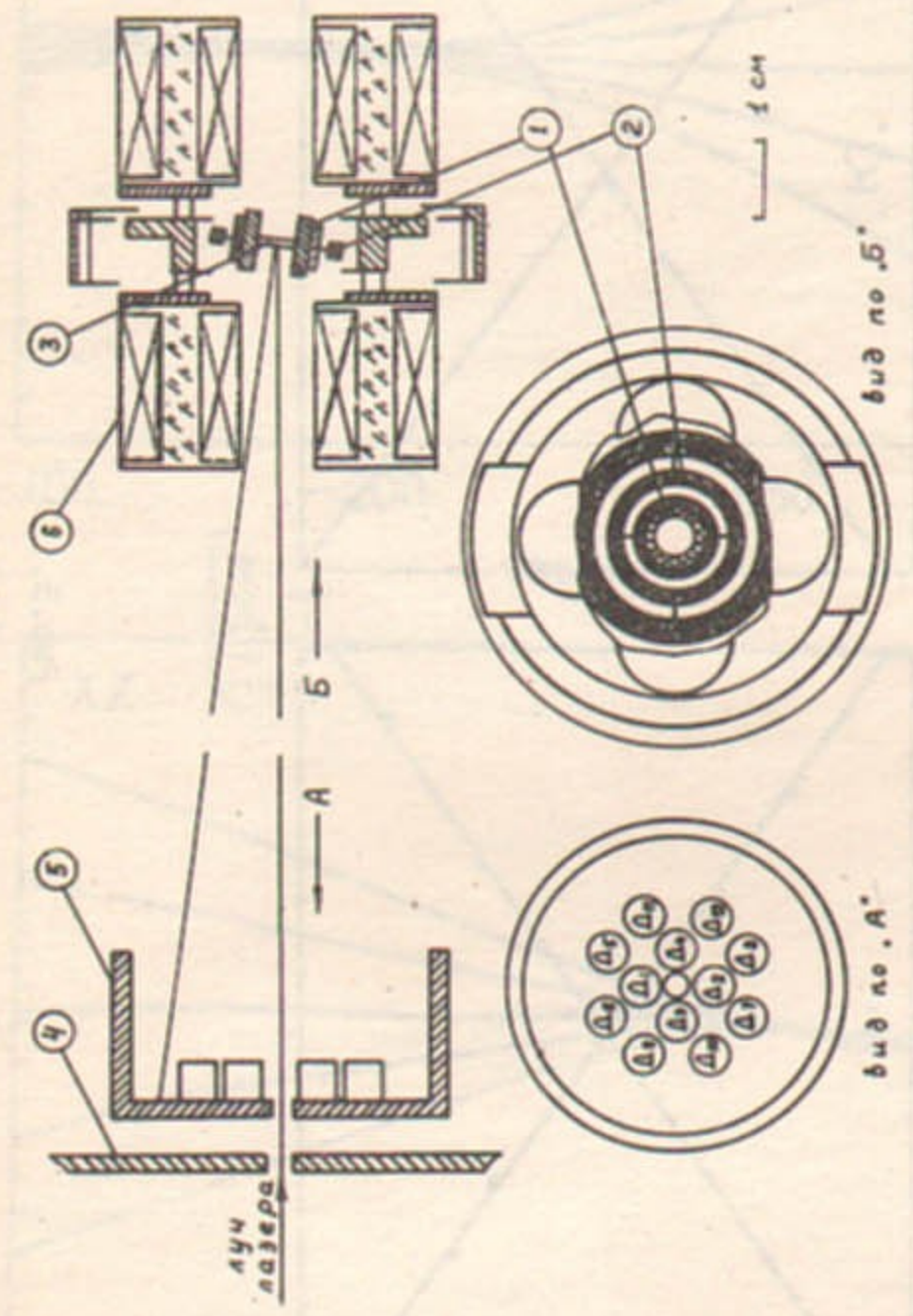


Рис.4.

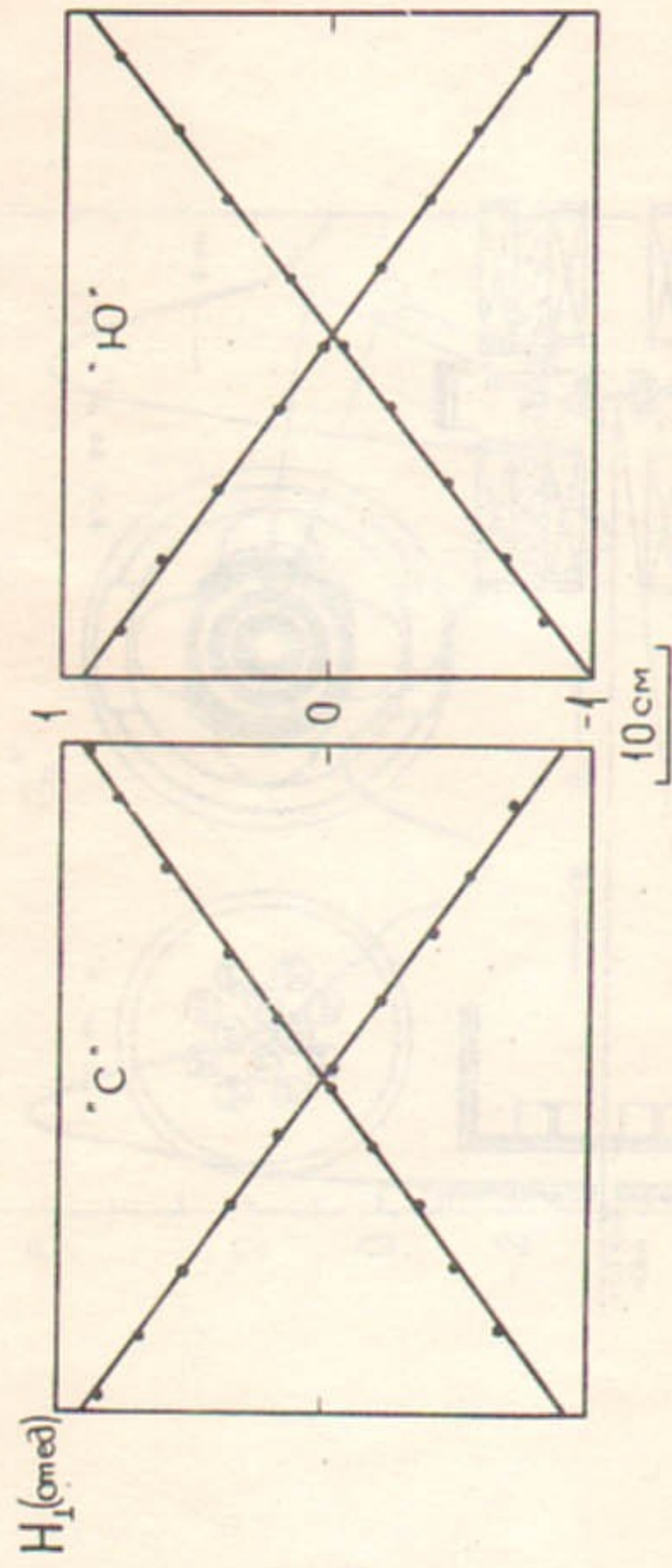


Рис. 5.

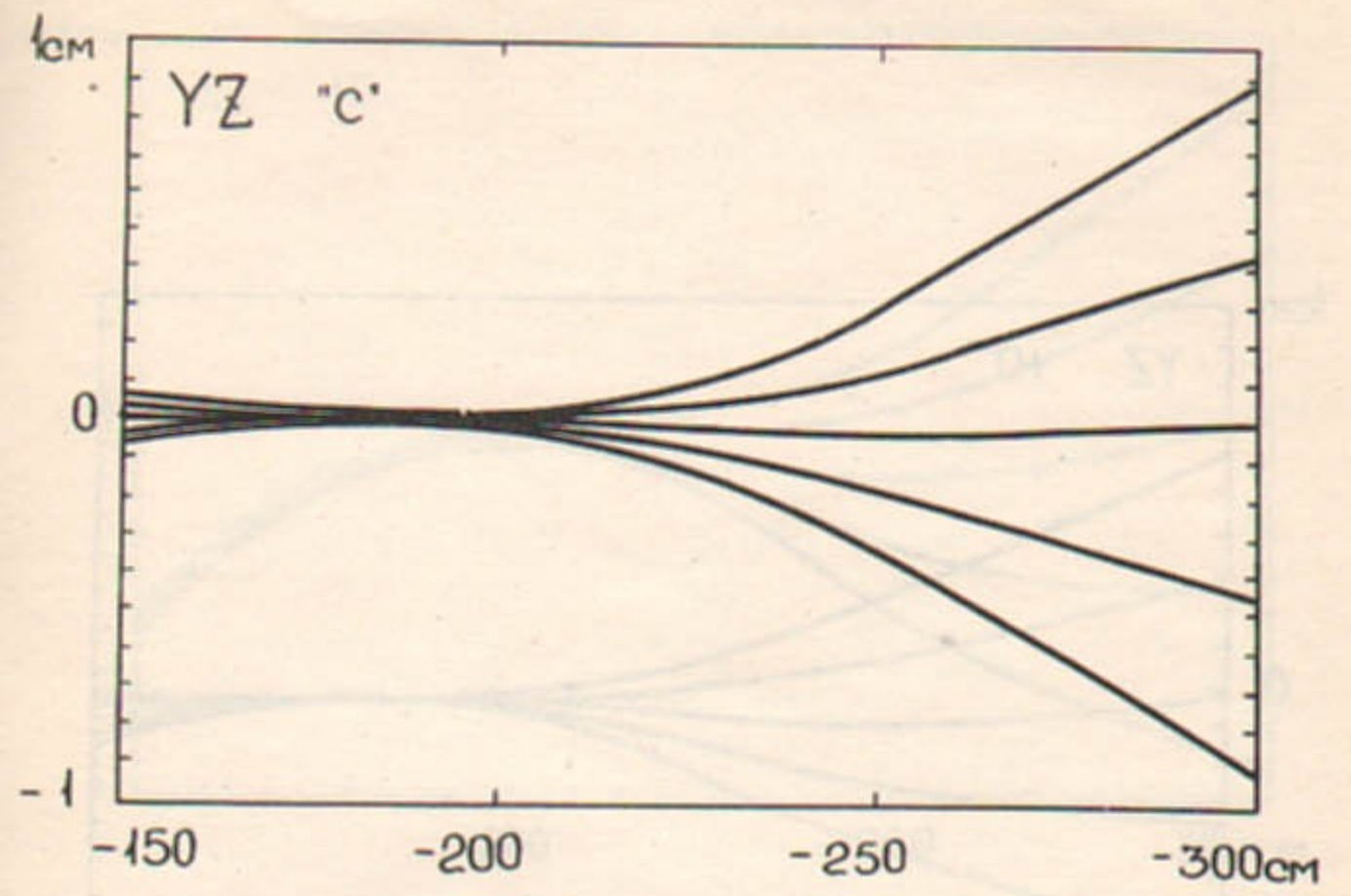


Рис. 6а

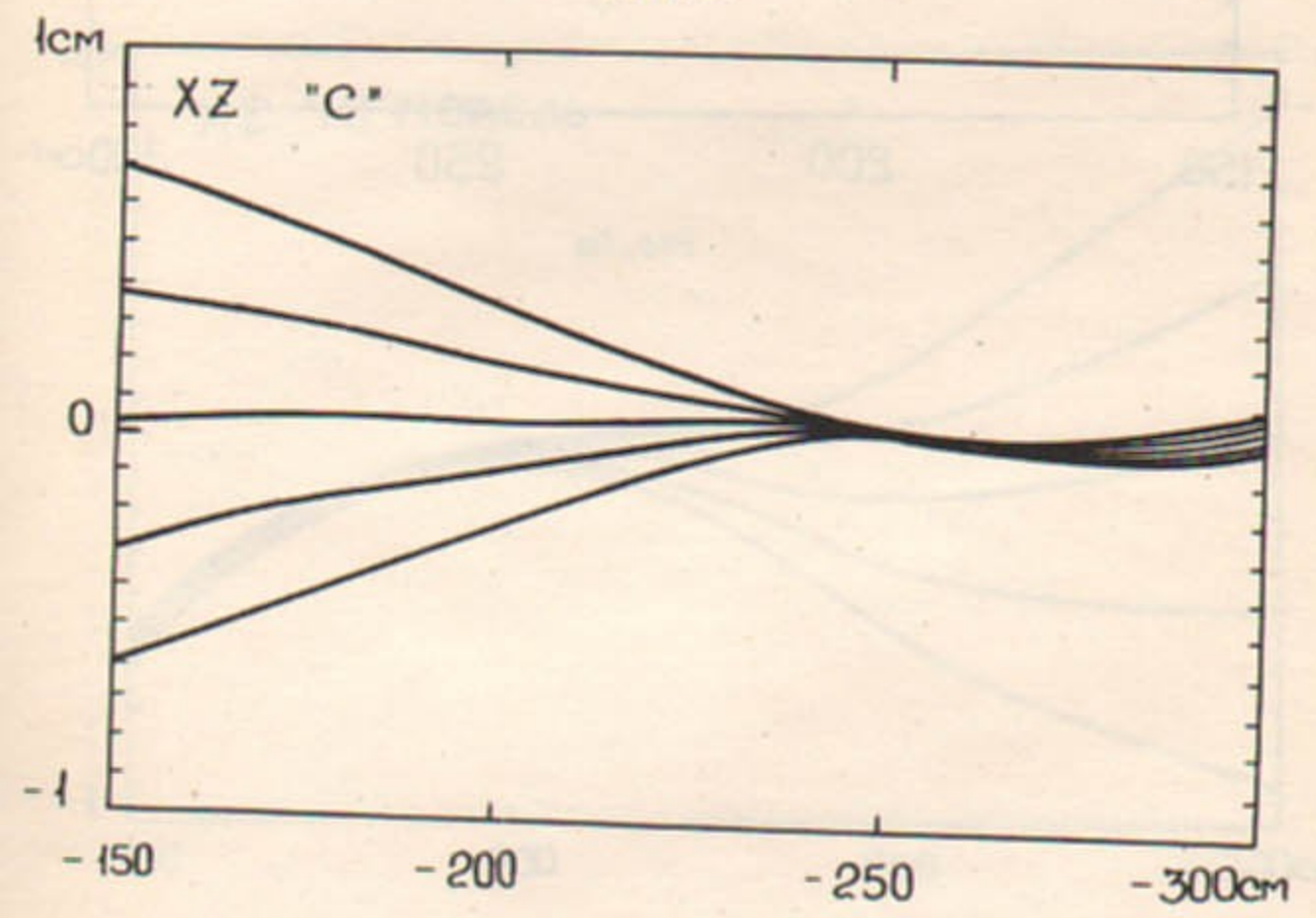


Рис. 6б

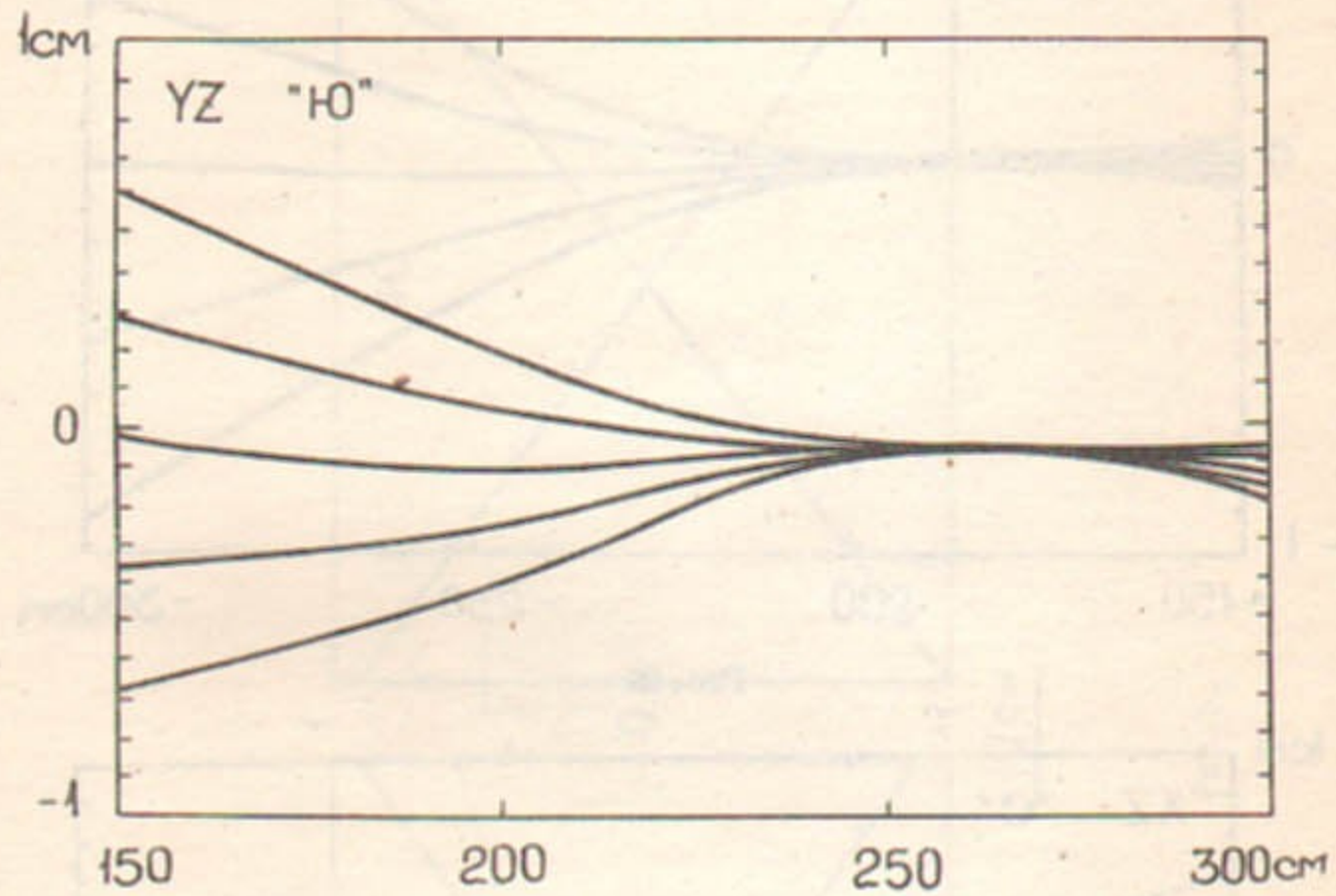


Рис. 6в

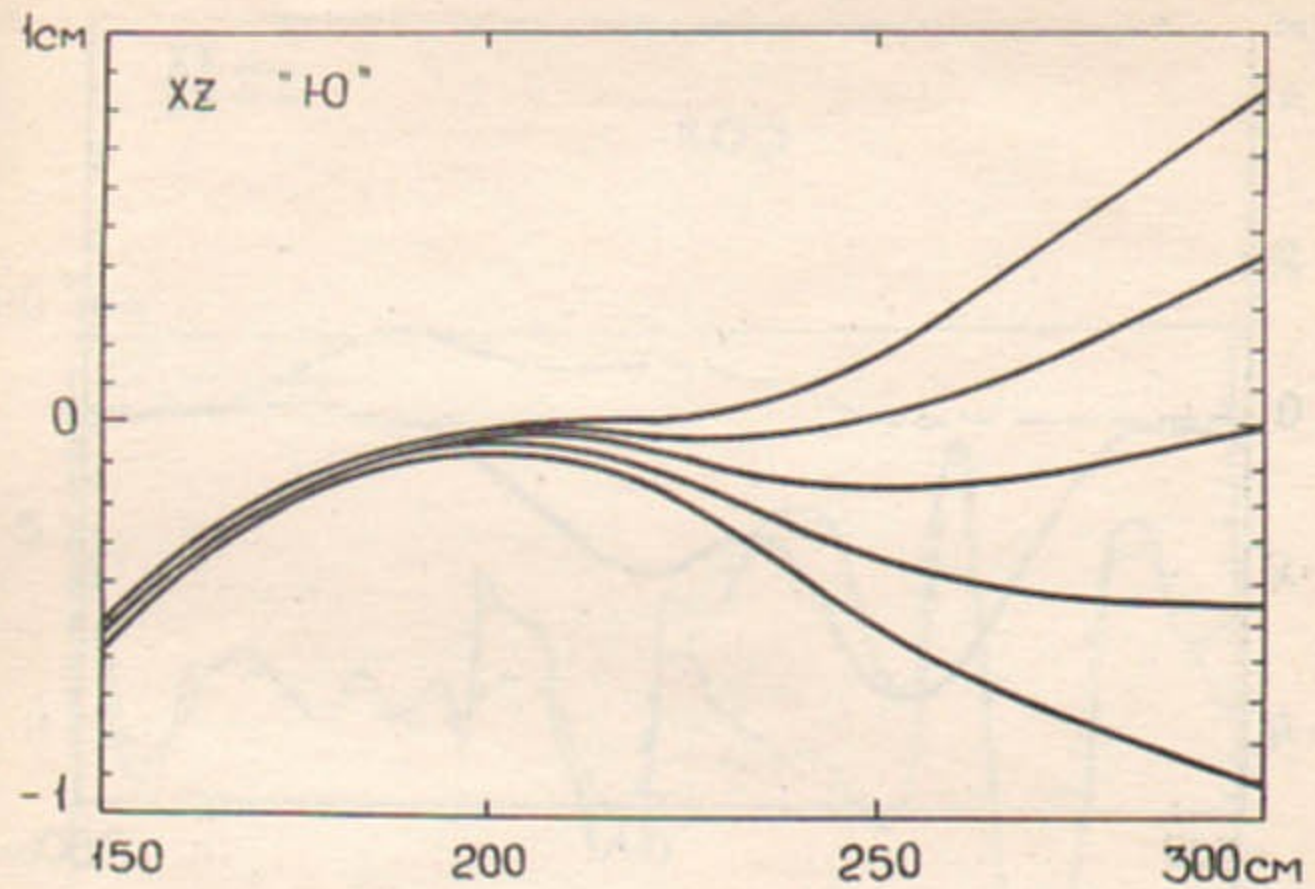


Рис. 7.

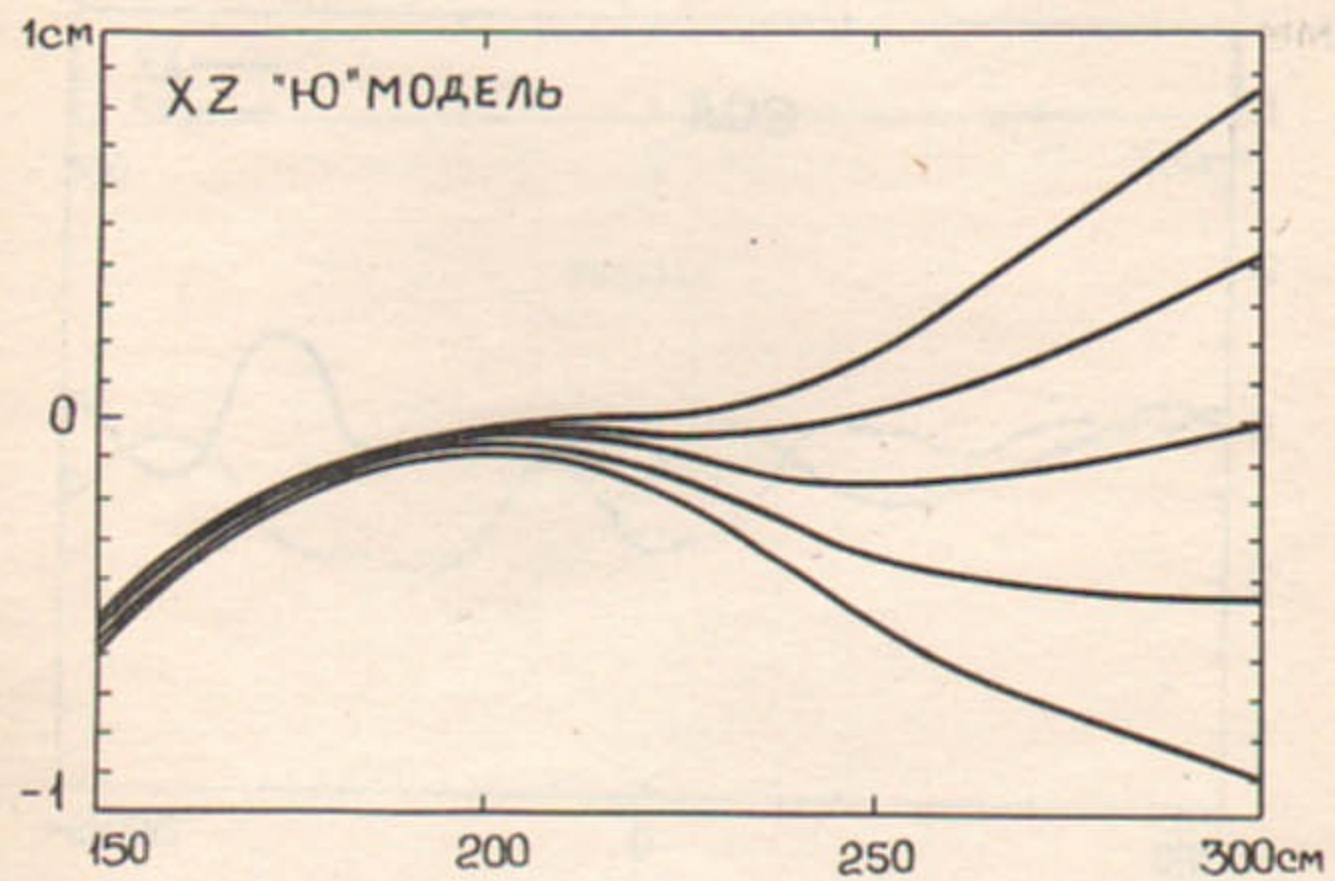


Рис. 8.

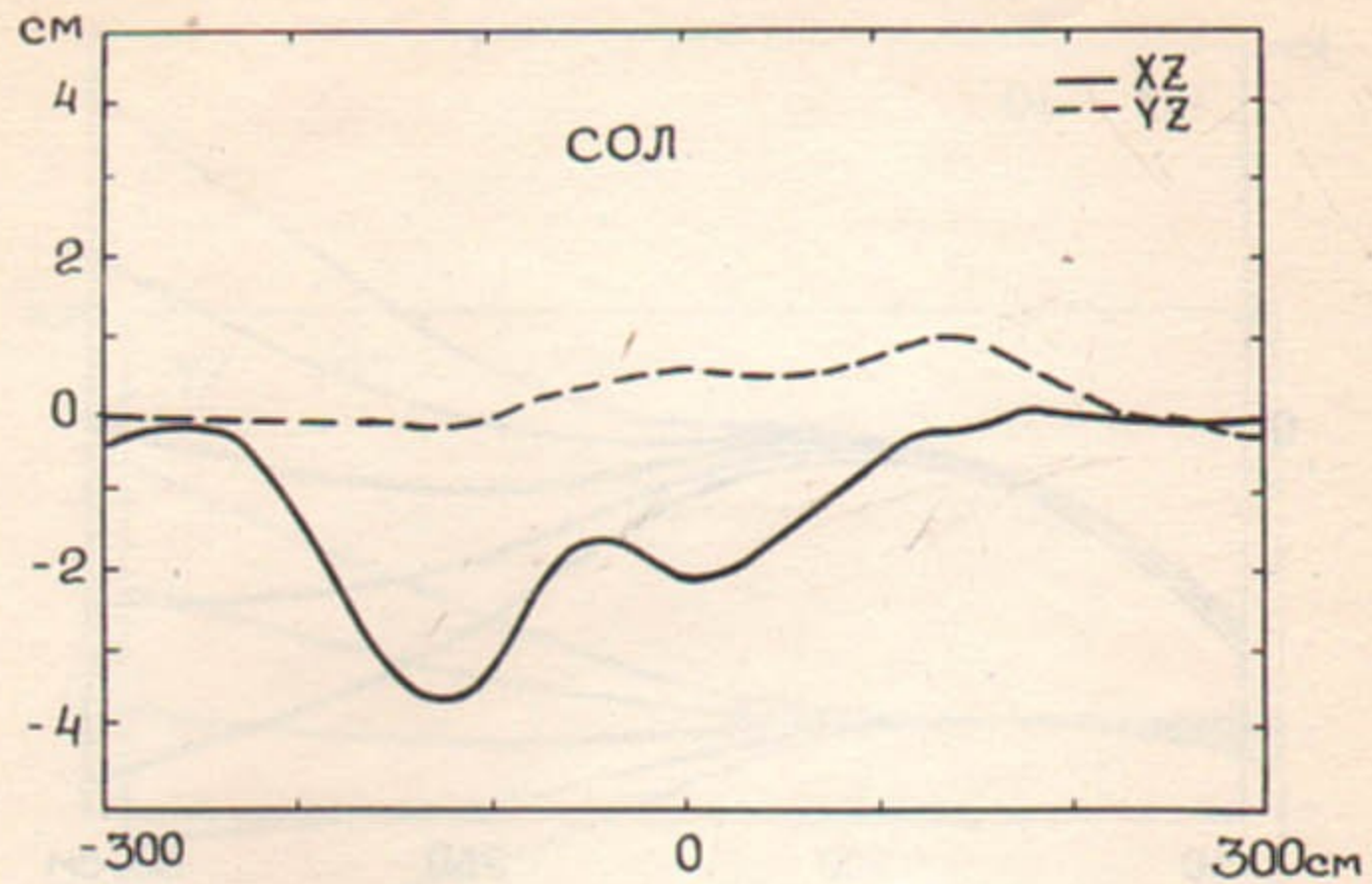


Рис. 9.

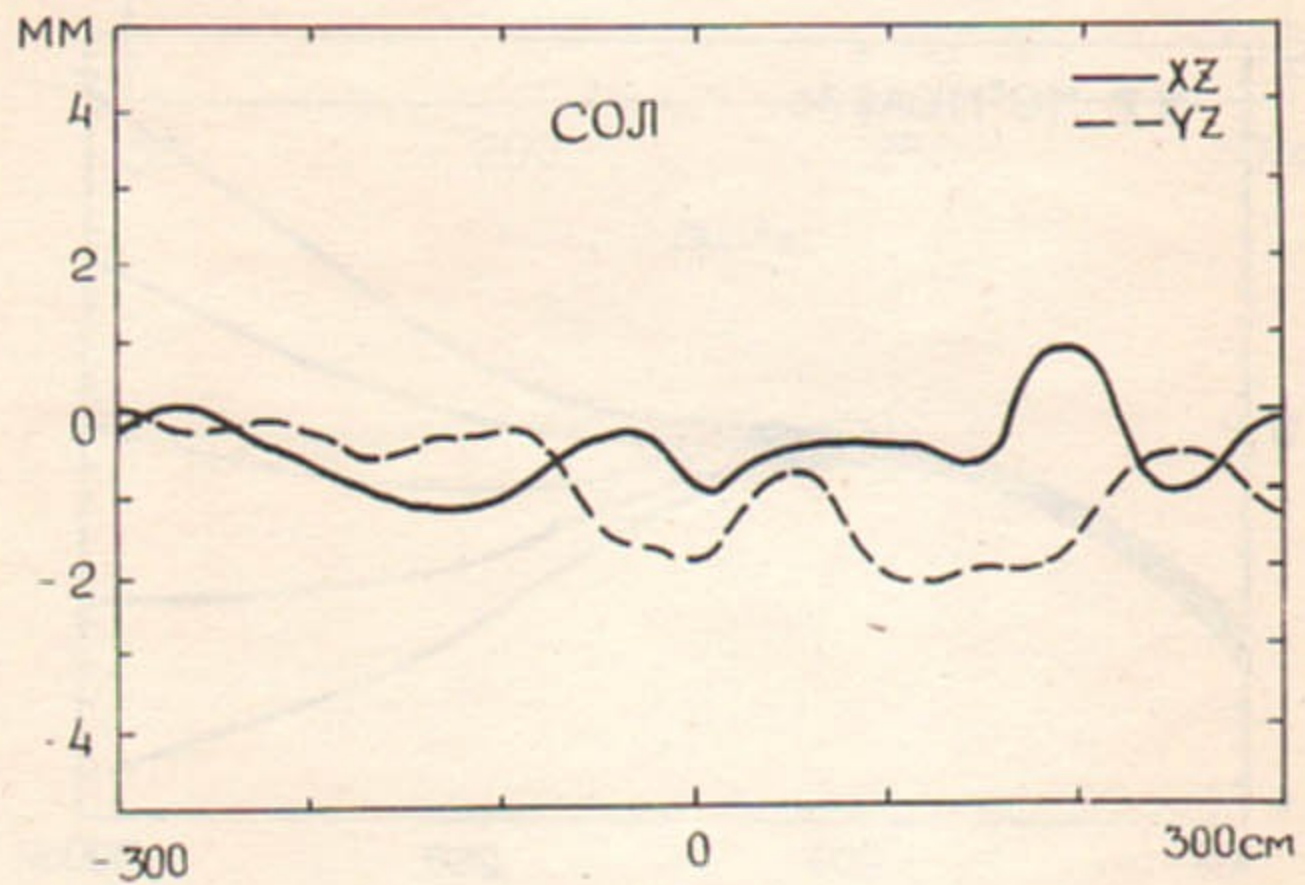


Рис. 10

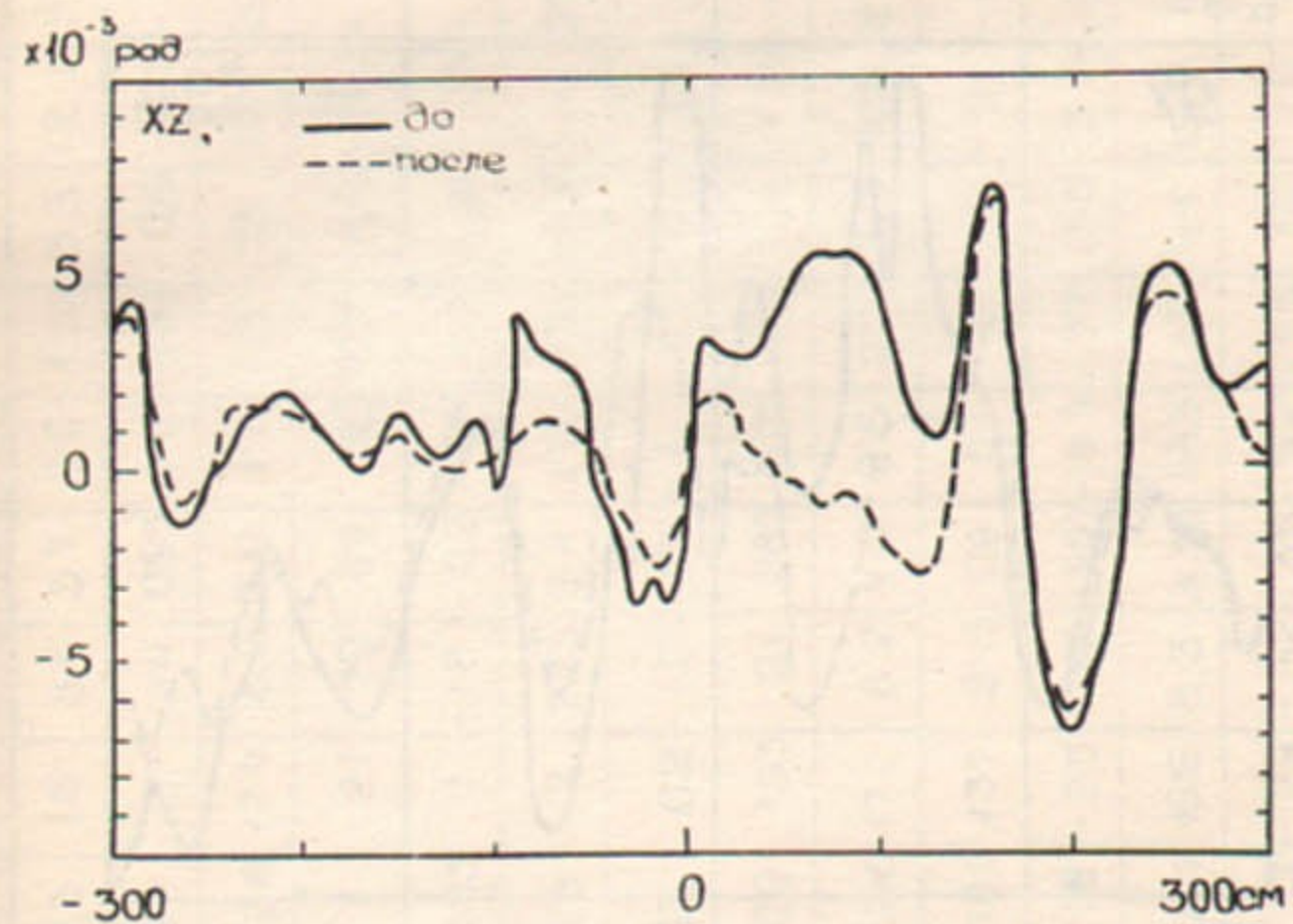


Рис. 11а

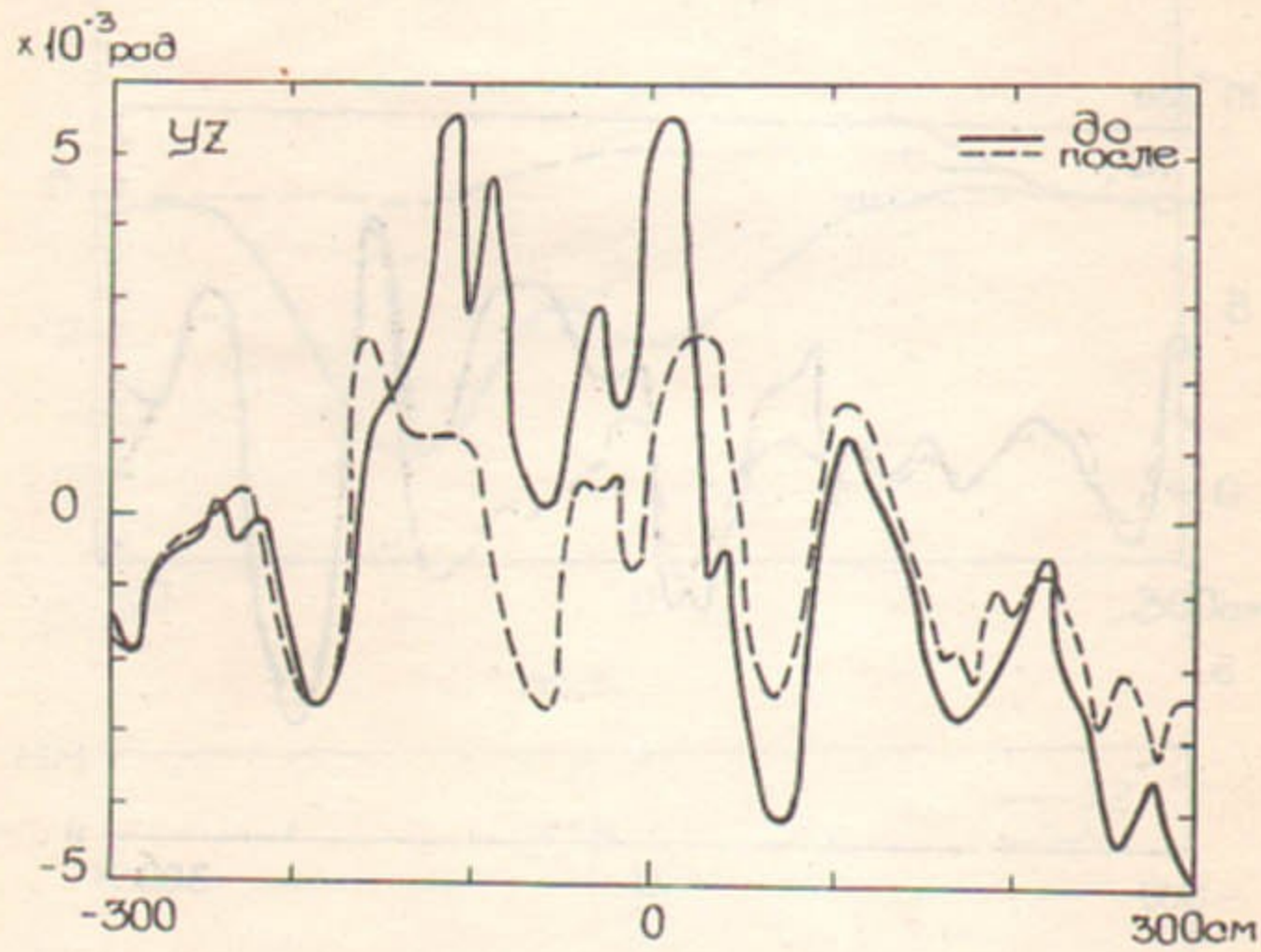


Рис. IIб

Вид возмущения идеальной системы	Координата Точка Z старта	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
Невозмущенная	X=30; Y=0	30	28.9	23	16	8.6	3.7	2.0	1.55	3.5	12.3	30	48	61
Плоская петля сдвинутая по Z на 1 см	X=0; Y=0	0	0.3	1.4	.27	.24	.095	0.12	-0.16	-0.6	-21	-52	-8	-1.1
	X=30; Y=0	30	28.5	22.6	17.4	8.9	3.6	1.7	1.5	3	12.1	29.9	47.2	60
	X=0; Y=30	0	0.3	.1	.21	.22	.09	.025	-0.08	-0.3	-1.1	-.3	-48	-62
Плоская катушка сдвинутая по X на 1 см	X=0; Y=0	0	0.48	0.83	0	-18	-22	-17	-138	-.3	-105	-15	-4.1	-55
	X=30; Y=0	30	28.9	23	17	7.75	3.4	1.75	1.35	3.15	11	27.2	43.5	56
	X=0; Y=30	0	0.05	0.7	.02	-1.25	-1.28	-.1	-.05	-.07	-.24	-.6	-.95	-1.25
Катушка "Унь-Янь" сдвинуты как целое по X на 1 см	X=0; Y=0	0	0.4	0.9	1.53	.21	.285	.527	.67	.3	-1.36	-4.8	-8.3	-11.4
	X=30; Y=0	30	28.9	22.6	17.2	8.2	4.0	2.5	2.2	3.8	10.9	25.4	39.7	51
	X=0; Y=30	0	0.38	0.85	1.37	2.15	2.9	5.1	7.9	.7	-.01	-1.4	-3.0	-4.2
Катушка "Унь-Янь" поверхности как целое вокруг X на 1 см	X=0; Y=0	0	-.1	-.18	-.25	-.31	-.357	-.53	-.37	.58	3.5	8.9	14.4	19.2
	X=30; Y=0	30	28.7	22.7	16.6	8.3	3.35	1.43	1.14	4.1	15.9	41	64.0	82
	X=0; Y=30	0	-.1	-.17	-.24	-.32	-.35	-.52	-.55	-.02	1.4	3.7	6.0	8.1

Рис. I2.