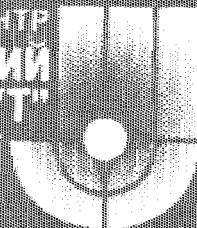


РОССИЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
"НУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ"



RU9810193

Л.С. Данелян, И.М. Егорова,
В.С. Куликаускас,
Д.Г. Баратов, Т.А. Белых

ИАЭ-5752/1

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ РЕЗЕРФОРДОВСКОГО
ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ
ОСАДКА ПРИМЕСЕЙ
НА ДИАФРАГМЕ ТОКАМАКА Т-3М

29 - 28

Москва — 1994

Ключевые слова: обратное рассеяние, поверхностная плотность, спектр, плазма, диафрагма, лимитер.

Методом резерфордовского обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}$ изучен осадок примесей на кольцевой диафрагме из углесталла, возникший в результате взаимодействия водородной плазмы с жидкометаллическим струйно-капельным лимитером. Приведены экспериментальные спектры, распределения поверхностных плотностей обнаруженных элементов вдоль направления от плазмы к стенке камеры, а также профили элементов по глубине. Проведена оценка коэффициента распыления основного элемента жидкометаллического лимитера.

The Rutherford backscattering of helium-4 ions was used for investigation of impurity deposited on the annular graphite diaphragm, as a result of the interaction between hydrogen plasma and liquid-metal spray limiter. The experimental RBS spectra, distributions of the impurity elements surface densities along the direction from the plasma to the chamber wall are presented as well as depth profiles of the elements. The erosion coefficient of the main liquid-metal limiter element (Ga) has been estimated.

Представляется важным вопрос об эрозии материалов в реальных условиях водородной плазмы токамака. Информация об эрозии материалов, контактирующих с плазмой, может быть получена с помощью системы «собирающих» зондов. Для оценки взаимодействия плазмы со струйно-капельным лимитером из эвтектического сплава галлий—индий—олово проведен анализ методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР) осадка на стационарной кольцевой диафрагме из углесталла УСБ-15. Элементы полоидальной диафрагмы, располагавшиеся в трех сечениях на обходе тора, находились в тени струйно-капельного лимитера и могли рассматриваться в качестве «собирающих» зондов. На рис. 1 схематически показано полоидальное сечение камеры Т-3М с элементами диафрагмы; из одного из элементов были изготовлены два образца размерами $21 \times 10 \times 7$ мм. Струйно-капельный лимитер располагался в другом торондальном сечении. В качестве второй группы «собирающих» зондов использованы образцы, вырезанные из гофра стенки сильфонной камеры токамака. Экспонирование «собирающих» зондов имело довольно сложную историю: в течение некоторого времени разряды в камере происходили без лимитера из сплава галлий—индий—олово, затем в течение 50 разрядов в камеру вводился лимитер и в дальнейшем проведены 500 разрядов без лимитера.

Анализ осадка на углесталле проведен методом РОР с ионами ${}^4\text{He}$ с энергией 3 МэВ. Спектры измерены во многих точках образцов как на ионной, так и на электронной стороне углесталла в направлении оси у от края плазмы ($y = 0$) к стенке камеры ($y = 42$ мм) через каждые 6 мм. На рис. 2 и 3 приведены нормированные спектры РОР, измеренные с ионами ${}^4\text{He}$. Для четкого массового разрешения элементов осадка измерены также спектры в трех точках вблизи плазмы ($y = 6, 12, 18$ мм) с ионами азота с энергией 16 МэВ (рис. 4). Четко видны пики элементов сплава — галлия, индия—олова (индий и олово не разрешаются между собой) и конструктивных материалов камеры и устройств в области W, Mo и Fe. По аналогии были определены места расположения примесей осадка в спектрах с ионами ${}^4\text{He}$. Слои Ga и Sn не находятся в глубине от поверхности под слоем Fe, Mo, W. В точках вблизи плазмы (спектры до точки $y = 24$ мм) пики указанных элементов четко просматриваются, в случае же спектра при $y = 30$ мм пики Sn, Mo и Ga сильно перекры-

ваются, на спектрах при $y = 36$ мм снова четко видны пики от Sn и Ga (плюс In). Для определения величин поверхностной плотности атомов обнаруженных элементов подбирались расчетные кривые спектров к экспериментальным, причем формы глубинного распределения W, Mo, Fe брались одинаковыми и широкими (согласно проявляющейся на спектрах форме для железа), а для Ga и Sn+In распределения брались узкими. Это приближение отражает сложную историю работы токамака.

На рис. 5 приведены подобранные расчетные спектры, в случае точек $y = 30$ и 36 мм ошибка в определениях количеств элементов Sn, Mo, Ga может достигать 25%. На рис. 6 приведены радиальные распределения поверхностных плотностей (ПП) элементов вдоль направления от плазмы к стенке камеры (ось y). Индекс «и» у элемента обозначает ионную сторону, индекс «э» — электронную. Содержание галлия возрастает в направлении оси y незначительно, а индия+олова — во много раз. Возрастает также ПП вольфрама и молибдена. Поверхностная плотность железа (не показанная на рисунке) примерно в 5—7 раз больше, чем галлия (порядка $10 \cdot 10^{17}$ ат./см²), и тоже слегка возрастает в направлении от плазмы к стенке камеры. Среднее значение ПП для галлия составляет $1,8 \cdot 10^{17}$ ат./см² (ионная сторона) и $0,7 \cdot 10^{17}$ ат./см² (электронная сторона). ПП для олова составляет $(0,15 \div 0,3) \cdot 10^{17}$ ат./см² до точки $y = 24$ мм, в точках же $y = 30$ мм и более — значительно растет и в точке $y = 36$ мм равна $2,9 \cdot 10^{17}$ ат./см² (ионная сторона). Отметим также, что на ионной стороне поверхностные плотности элементов Ga, Sn примерно в 2 раза больше, чем на электронной. Более тяжелые элементы — W, Mo — распределены иначе: на ионной стороне их больше до $y \approx 18$ мм, при $y > 18$ мм их больше на электронной стороне.

Определены также профили элементов по глубине, некоторые из них приведены на рис. 7. На рис. 8 показано распределение полуширин (ширина на половине максимума) профилей в направлении оси y . Тенденция роста полуширин в направлении оси y соответствует характеру распределения поверхностных плотностей (см. рис. 6). Толщина слоев галлия и олова изменяется одинаково от 1500 до 3500 Å. Отметим также, что вблизи плазмы доминирует количество галлия над количеством олова+индия по сравнению с исходным содержанием этих элементов в струе лимитера. Вдали от плазмы больше олова+индия. На образцах из стенки камеры ПП Ga и (Sn+In) примерно на два порядка меньше, чем на углесталле. Это же следует из данных анализа образцов методом оже-электронной спектроскопии (ОЭС). Полученная методами ОЭС и

РОР грубая оценка коэффициента эрозии основной компоненты (G_a) лимитера составила порядка $5 \cdot 10^{-2}$ ат./ион. Эта оценка проведена в предположении, что продукты эрозии лимитера осаждаются только на боковых поверхностях диафрагмы и однородно в полоидальном направлении. Однако даже малый однородный поток примесей на стенку с учетом того, что ее площадь на два порядка величины превышает поверхность диафрагмы, может заметно увеличить коэффициент эрозии. Анализ методом РОР образцов стенки позволяет скорректировать величину коэффициента эрозии и считать его оценку сверху 0,1 ат./ион плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение примесей методом РОР на кольцевой диафрагме камеры токамака позволило установить:

1. Поверхностная плотность элементов лимитера и конструкционных материалов возрастает в направлении от плазмы к стенке камеры. Такой характер распределения не противоречит модели «чистки» плазмой прилегающих к ней участков диафрагмы и пересаджению продуктов эрозии в периферийные (пристеночные) области.

2. На ионной стороне образцов количество атомов примесей в осадке примерно в 2 раза больше, чем на электронной; превышение является следствием дрейфового движения ионов в направлении индукционного электрического поля токамака.

3. Коэффициент распыления элемента лимитера (G_a) равен 0,1 ат./ион

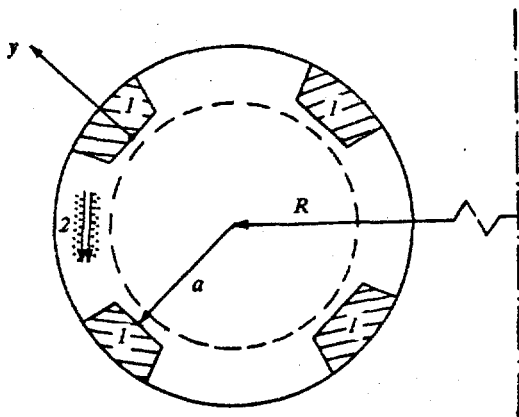


Рис. 1. Схема полоидального сечения токамака с условным совмещением струйно-капельного лимитера и кольцевой диафрагмы: 1 — элементы кольцевой диафрагмы из углеродистого материала; 2 — струйно-капельный лимитер; $R = 95$ см, $a = 16$ см — большой и малый радиусы плазмы; y — ось направления анализа поверхности элемента кольцевой диафрагмы, $y = 0$ вблизи плазмы, $y = 42$ мм — стенка камеры

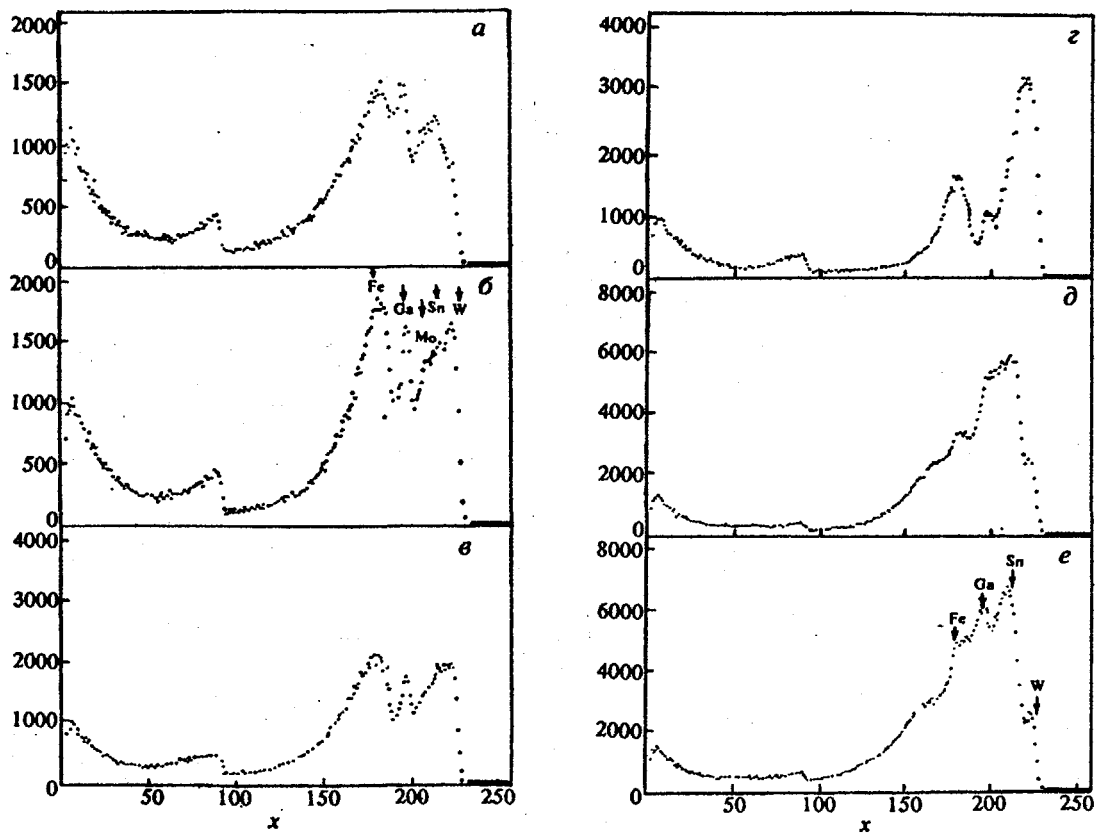


Рис. 2. Нормированные спектры ROP с ионами ^4He на ионной стороне образца (по оси x — номер канала анализатора). Координаты исследованных точек по оси y , мм: *a* — 6; *б* — 12; *в* — 18; *г* — 24; *д* — 30; *е* — 36

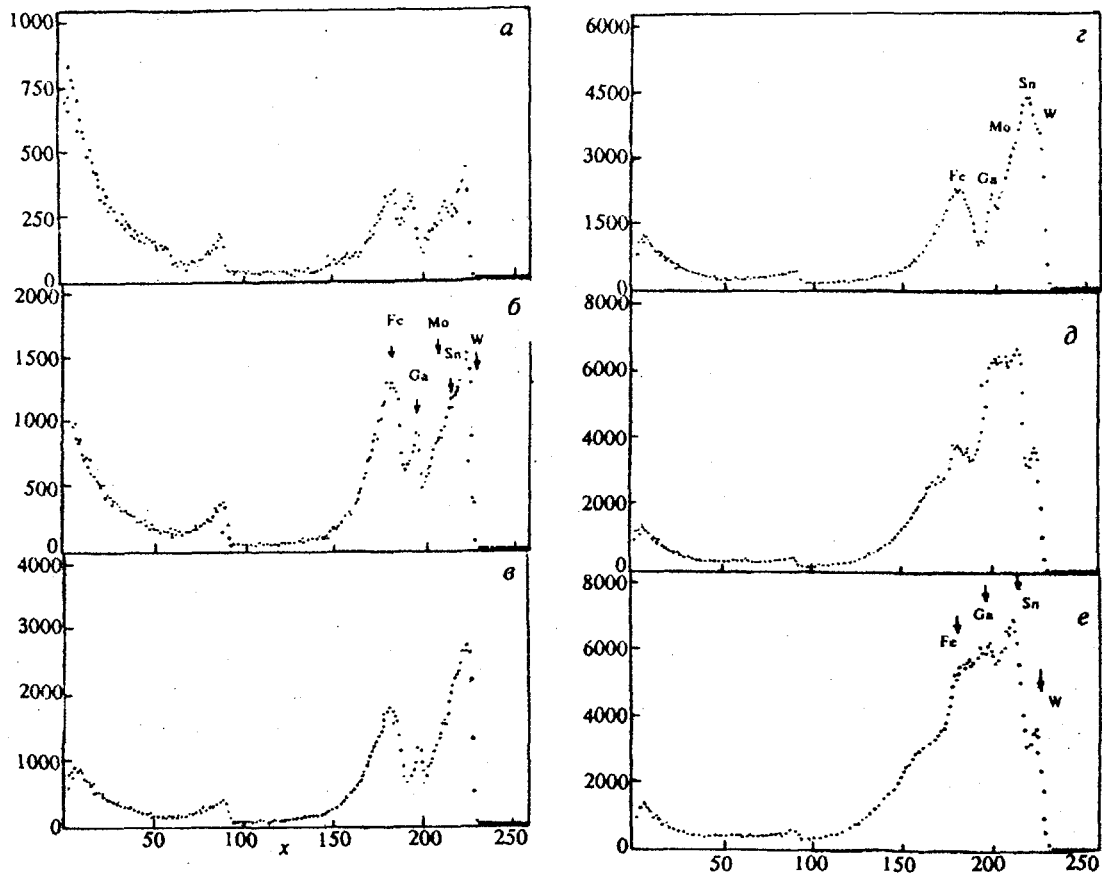


Рис. 3. Нормированные спектры POP с ионами ^4He на электронной стороне образца (по оси x — номер канала анализатора). Координаты исследованных точек по оси y , мм: a — 6; b — 12; c — 18; d — 24; e — 36

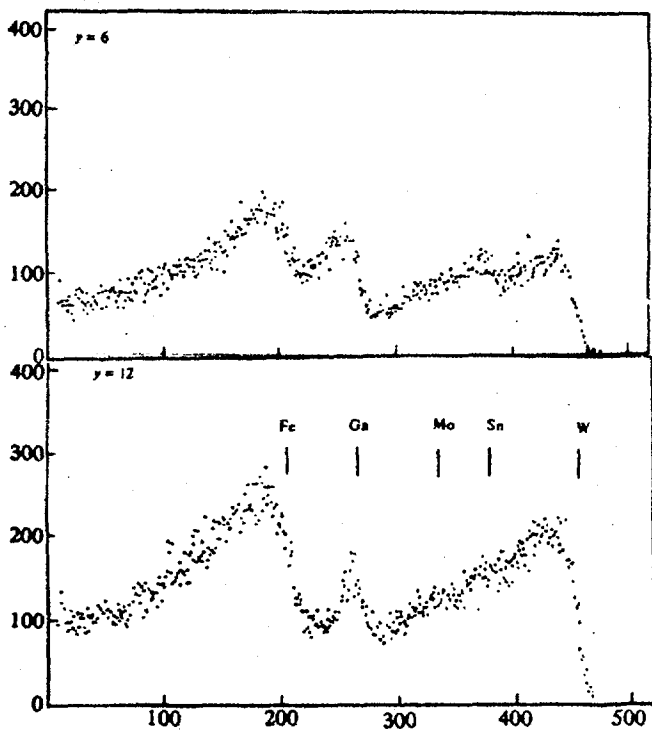


Рис. 4. Спектр ROP с ионами азота с энергией 16 МэВ

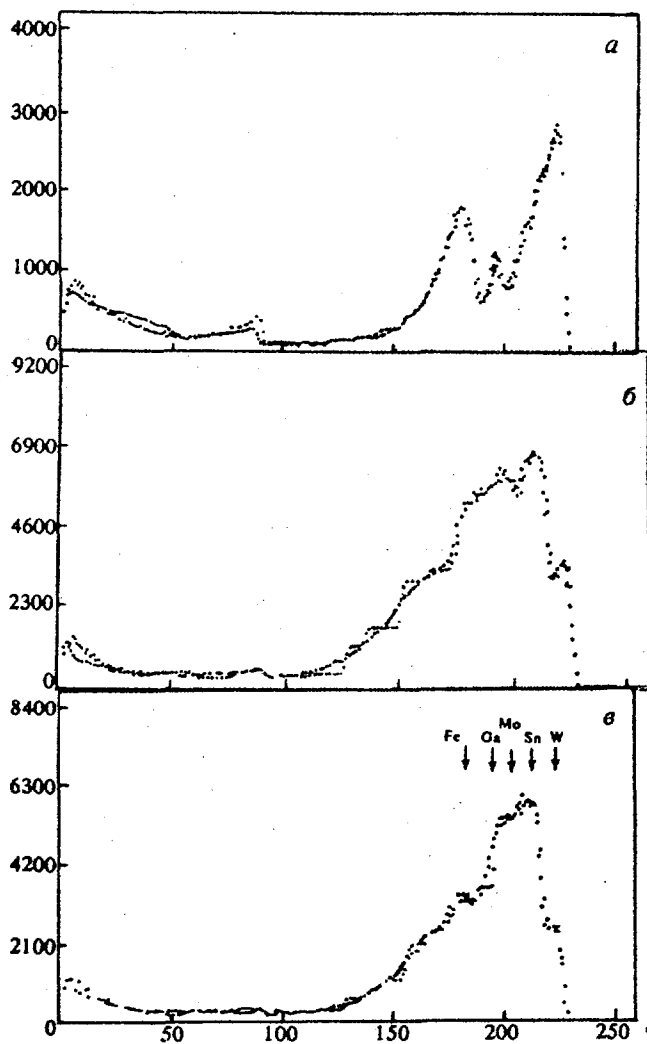


Рис. 5. Расчетные спектры, подобранные к экспериментальным: а — $y = 18$ мм (электронная сторона); б — $y = 36$ мм (электронная сторона); в — $y = 30$ мм (ионная сторона)

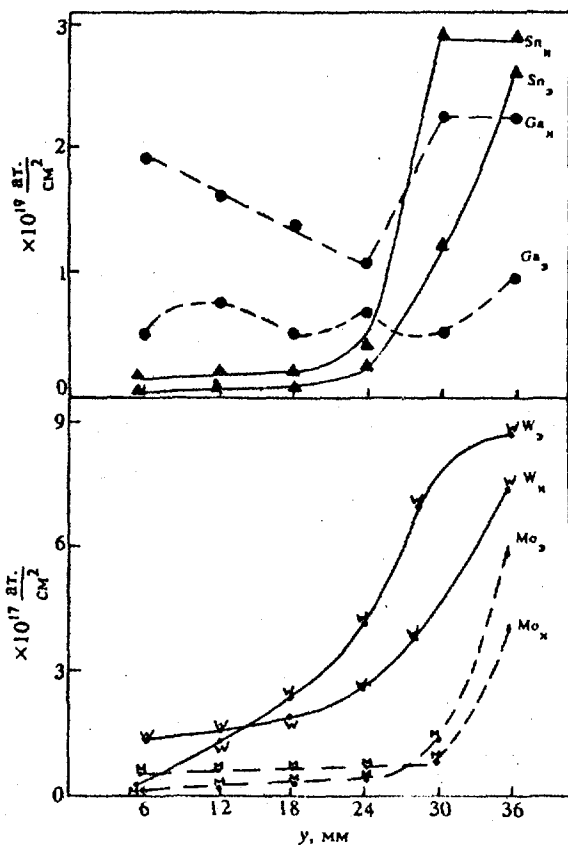


Рис. 6. Радиальные распределения поверхностных плотностей элементов осадка вдоль направления оси y от края плазмы к стенке камеры

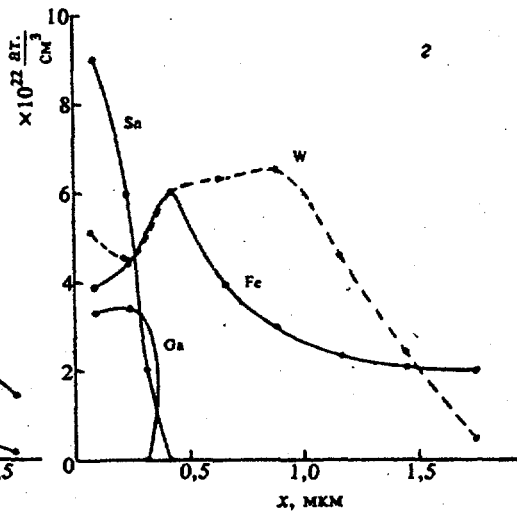
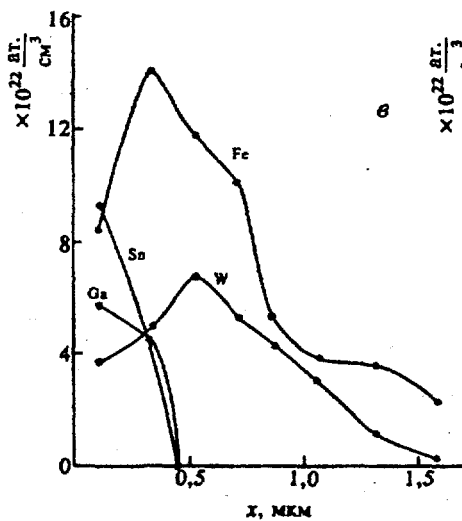
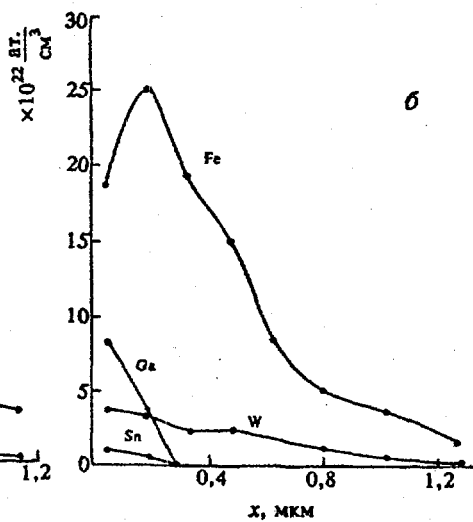
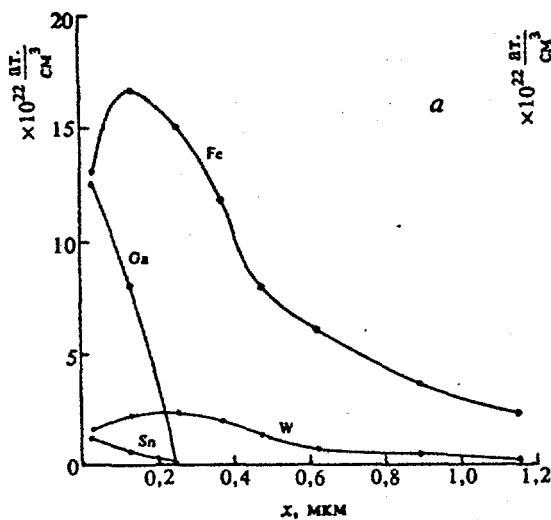


Рис. 7. Профили распределения элементов осадка по глубине в различных точках образца углесталла: а — $y = 6$ мм; б — $y = 18$ мм; в — $y = 30$ мм, ионная сторона; г — $y = 36$ мм, электронная сторона

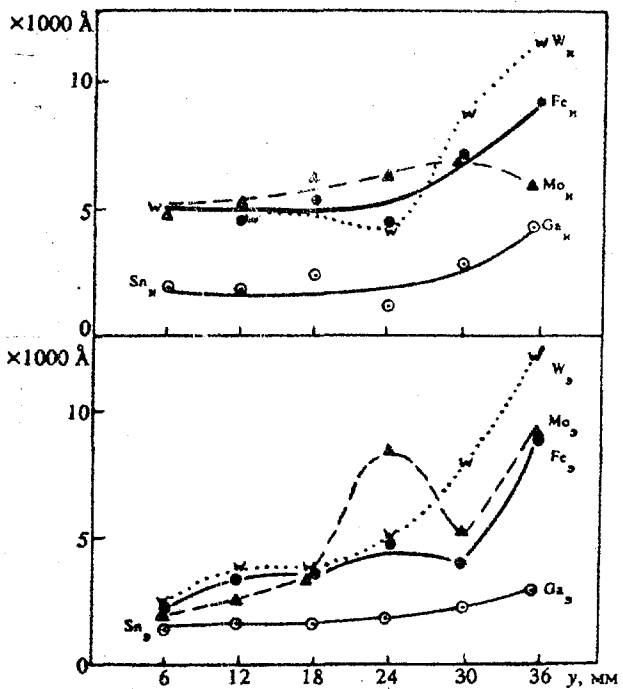


Рис. 8. Распределения полуширин глубинных профилей элементов в направлении оси y .

Редактор О.В. Базанова
Технический редактор С.К. Сведлова
Корректор В.П. Горячева

Подписано в печать 20.04.94. Формат 60×90/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,5
Тираж 65. Заказ 83. Индекс 3624

Отпечатано в РНИИ «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова

Индекс 3634

Препринт ИАЗ-5752/1. М., 1994