

17

**И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР**

ИЯФ 27-71

В.С.Григорьев, Г.М.Протопопова, В.С.Сынах

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ
ФОТОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ
ДЛИННОВОЛНОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Новосибирск

1971

В.С.Григорьев, Г.М.Протопопова, В.С.Сынах

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТО-
ГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ ДЛИННО-
ВОЛНОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе предлагается новый тип фотодозиметра, который
рекомендуется применять для проведения дозиметрического
контроля в диапазоне энергий квантов 10-1250 кэв и доз от
5-100 мр до 100-1800 р, на основе отечественных плёнок типа
РМ-5-1, КН-1 и А-2 (дубль-негативная). Приведенные данные
по дозовым факторам накопления и спектральному распределе-
нию излучений низких энергий могут быть использованы для
расчётов защиты и других целей прикладной дозиметрии.

Фотографическая дозиметрия длинноволнового рентгеновского излучения имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами. Чувствительность рентгеновских пленок в этой области энергий 3-5 мр, фильтры - поглотители позволяют оценивать эффективную энергию излучения, что необходимо для определения поглощенной дозы. Недостатки метода состоят в сложности и трудоёмкости обработки результатов измерений. Недостаток дозиметрической плёнки - большой ход с жесткостью, можно обратить в её достоинство, если использовать его для определения эффективной энергии излучения.

§ 1. Теоретический расчёт и сравнение с экспериментальными данными хода с жесткостью дозиметрической плёнки РМ-5-1.

Рассмотрим зависимость почернения плёнки РМ-5-1 от энергии квантов рентгеновского излучения при постоянной дозе. Для этого используем формулу, предложенную Гринингом [1]

$$\frac{E_{AgBr}, \text{ эрг/2}}{E_{воз}, \text{ эрг/2}} = \frac{\mu_{1a}/\rho_1}{\mu_{2a}/\rho_2} F_1 F_2 F_3 + F_4$$

где, - E_{AgBr} , $E_{воз}$ - энергия рентгеновского или гамма-излучения, поглощенная граммом бромистого серебра и воздуха соответственно; μ_{1a}/ρ_1 , μ_{2a}/ρ_2 - массовые коэффициенты поглощения бромистого серебра и воздуха соответственно; F_1 - поправка на флуоресценцию; F_2 - поправка, учитывающая энергию ^{выбитых из} электронов эмульсии; F_3 - поправка на потерю энергии электронов в желатине; F_4 - поправка на поглощение эмульсией энергии электронов, выбитых из упаковки.

Так как Д.Грининг не приводит данных о расчётах для энергий менее 27,6 кэв, то были предварительно рассчитаны пробеги электронов в эмульсии и подложке, энергетический вклад электронов различных групп. Средняя энергия электронов отдачи рассчитывалась по формуле:

$$\bar{E} = \frac{\text{сечение поглощения} \times \text{энергия первичного кванта}}{\text{полное сечение рассеяния}}$$

Данные по сечениям взяты из работы Б.Прайса с соавторами /2/. Выход ω_L - флуоресценции серебра и брома рассчитывался по формуле /3/

$$\left(\frac{\bar{\omega}_L}{1-\bar{\omega}_L}\right)^{1/4} = A + Bz,$$

где $A = 0,132$; $B = 0,00917$.

Количество бромистого серебра, желатины и подложки, приходящееся на см^2 для дозиметрической плёнки РМ-5-1 в стандартной упаковке, определялось экспериментально. Эти количества соответственно равны 4,44, 5,56, 26,2 ($\text{мг}/\text{см}^2$).

Результаты вычислений (сплошная кривая) представлены на рис.1. Экспериментально ход с жесткостью плёнки РМ-5-1 в диапазоне энергий квантов 8-60 кэВ определялся при помощи нормальной камеры и характеристического рентгеновского излучения, полученного от различных мишеней. Облучение плёнки при энергии 141 кэВ, 661 кэВ и 1250 кэВ проводилось на открытом воздухе, чтобы уменьшить вклад рассеянного окружающими предметами излучения. Облученные плёнки вместе с вуальной проявлялись одновременно и затем метрировались на денситометре ДФЭ-10. Из полученных почернений вычиталось вуальное. Почернение плёнки при энергии излучения равной 661 кэВ и дозе 100мр принималось за единичное, и относительно его проведена нормировка для почернений при других значениях энергии. Рассчитанный и экспериментальный ход с жесткостью нормировались при энергии 661 кэВ, а для значений, взятых из работы /4/ при энергии 65 кэВ.

Как видно на рис.1, получено хорошее согласие данных теоретического расчёта с экспериментом при облучении дозиметрической плёнки моноэнергетическим излучением. При облучении фильтрованным рентгеновским излучением наблюдается расхождение до 50% для данных работы /4/ и до 25% по результатам нашей работы. Большой разброс экспериментальных точек с теоретическими объясняется тем, что пучки эффективного рентгеновского излучения, применяемые для градуировки в работе /4/, были недостаточно однородны. Учитывая это, мы использовали фильтры большой толщины. Состав и толщины комбинированных фильтров заимствовали из работы /5/. Собственная фильтрация

рентгеновской трубки составляла около 2,5 мм алюминия, что еще больше увеличило фильтрацию первичного пучка.

Расположение экспериментальных точек при эффективной энергии 13,4 кэВ и 17,6 кэВ выше теоретической кривой объясняется тем, что эффективная энергия 13,4^{кэВ} получена при напряжении на трубке около 18 кВ без дополнительных фильтров, а 17,6 кэВ - при напряжении 20 кВ и алюминиевом фильтре 0,94 мм.

Значительное расхождение данных работы /4/ с нашими в области энергий квантов более 300 кэВ, видимо, объясняется тем, что градуировка плёнки авторами работы /4/ проводилась в условиях, когда вклад рассеянного излучения был значительным. Кроме того, источники, применяемые для градуирования плёнки должны иметь большую удельную активность /6/ с целью уменьшения влияния рассеянного в источнике низкоэнергетического излучения /7, 8/.

Энергетическая зависимость плотности почернения дозиметрической плёнки РМ-5-1 (рис.1) была использована для расчёта фильтров.

§ 2. Расчёт фильтров кассеты для измерения длинноволнового рентгеновского излучения

Между плотностью почернения плёнки и дозой излучения существует пропорциональность. Область пропорциональности для различных эмульсий может быть различной. В области пропорциональности можно записать

$$S_0 = K D_0 f(E), \quad (1)$$

где S_0 - почернение плёнки; D_0 - доза рентгеновского или гамма-излучения; K - коэффициент пропорциональности; $f(E)$ - функция чувствительности плёнки. Почернение плёнки под фильтром толщиной X_1 будет:

$$S_1 = K D_0 e^{-\mu X_1} B_1(E, \mu X_1) f(E, \mu X_1),$$

где $B_1(E, \mu X_1)$ - дозовый фактор накопления; μ - линейный коэффициент ослабления излучения с энергией E . Для фильтра любой толщины имеем:

$$S_i = K D_0 e^{-\mu X_i} B_i(E, \mu X_i) f(E, \mu X_i). \quad (2)$$

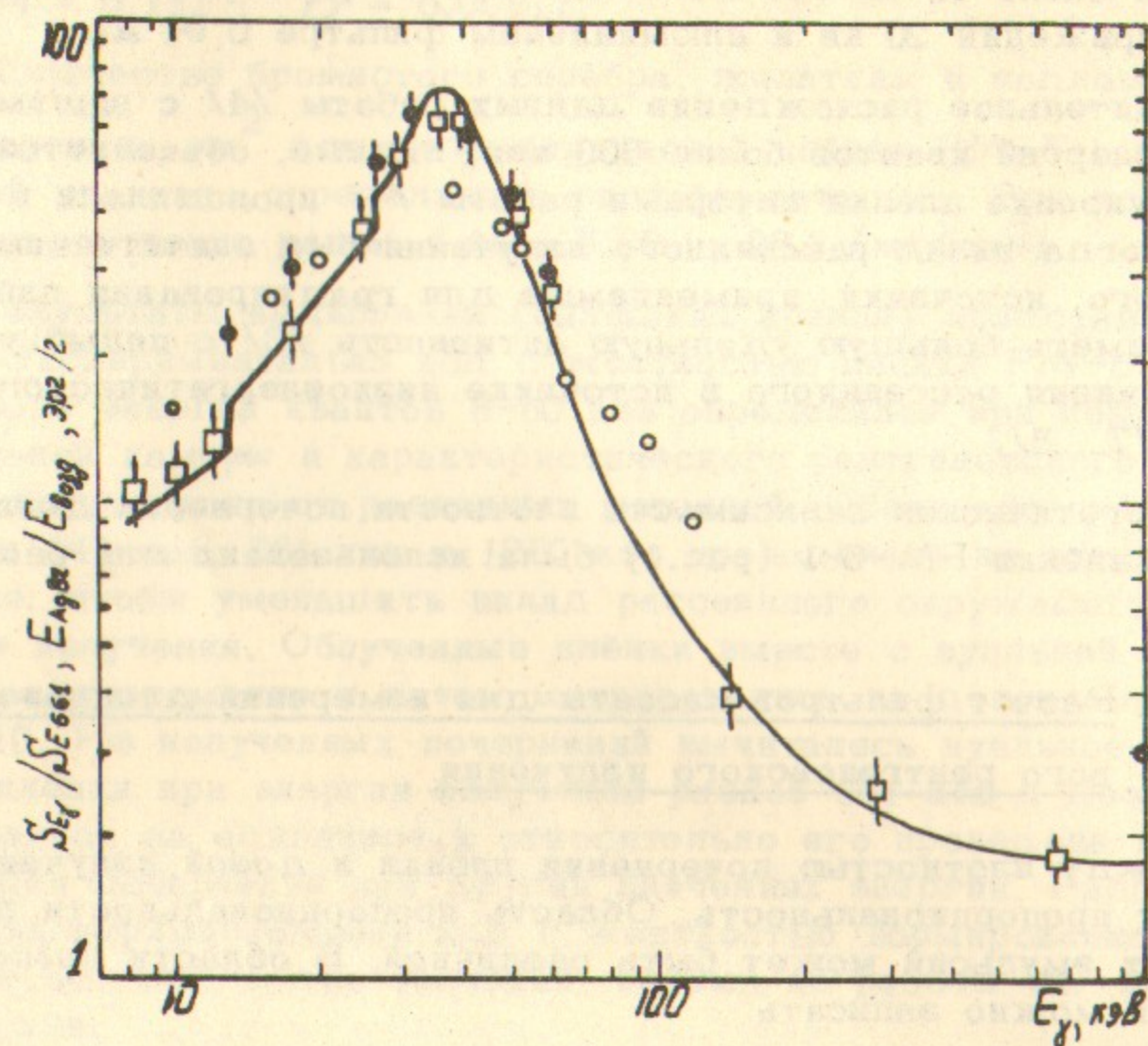


Рис.1. Зависимость плотности почернения плёнки типа РМ-5-1 от энергии квантового излучения при постоянной дозе.

- - моноэнергетическое излучение;
- - энергия излучения, определенная по слою половинного ослабления;
- - данные работы [4].

Почернение плёнки определяется дозой рентгеновского излучения, фактором накопления и функцией чувствительности, которая сильно зависит от энергии первичных и вторичных квантов. Запишем отношения для почернений:

$$\frac{S_0}{S_1} = \frac{f(E)}{e^{-\mu x_1} B_1(E, \mu x_1) f(E, \mu x_1)} ; \dots ; \quad (3)$$

$$\frac{S_i}{S_{i+1}} = \frac{e^{\mu(x_{i+1} - x_i)} B_i(E, \mu x_i) f(E, \mu x_i)}{B_{i+1}(E, \mu x_{i+1}) f(E, \mu x_{i+1})}$$

Если зададимся величинами отношений (3), количество которых определяется требуемой точностью нахождения дозы и энергии излучения, то зная факторы накопления и энергетические спектры после прохождения первичного излучения через фильтры, можем определить необходимые толщины фильтров.

Материал фильтров должен быть достаточно химически чистым, по возможности толщины фильтров должны соответствовать или быть кратными стандартным промышленным толщинам материала. Характеристическое излучение фильтра должно иметь низкую энергию, чтобы почернение плёнки за счёт этого излучения было минимальным. Материалом, отвечающим таким требованиям, является медь. Толщина фильтра должна быть минимально-возможной, чтобы угловая зависимость чувствительности дозиметров была меньшей. Данных по факторам накопления и энергетическим спектрам для меди при малых значениях μx и низких энергиях в барьерной геометрии в литературе нет. Поэтому их необходимо было рассчитать.

Дозовые факторы накопления и энергетические спектры для фильтров из меди и алюминия рассчитывались методом Монте-Карло на БЭСМ-6 в барьерной геометрии для плоского мононаправленного источника.

Диапазон энергий квантов для меди в расчётах брался от 50 кэВ до 1000 кэВ, для алюминия от 30 до 150 кэВ. Прослеживалась история ста тысяч квантов, при этом учитывались следующие

шие эффекты и приближения.

1. Когерентное рассеяние. Угловое распределение рассеянных квантов определялось по классической формуле.

2. Фотоэффект. Учитывалось характеристическое излучение.

3. Комptonовское рассеяние. Угловое распределение электронов отдачи определялось нерелятивистской формулой.

Длина пробега электрона в веществе как функция его кинетической энергии задавалась таблично. Траектории электронов считались прямыми. Остаточная энергия после прохождения толщины R определялась следующим образом; из длины пробега R_0 вычиталась толщина R и по разности $\Delta R = R_0 - R$ обратным интерполированием по таблице пробегов находилась энергия.

Дозовые факторы накопления для меди представлены в таблице 1.

На рис.2 приведены энергетические спектры рассеянного излучения после прохождения первичного излучения через фильтры.

По формуле (3) рассчитывались отношения почернений

S_0/S_1 (рис.3), S_1/S_2 (рис.4) и S_2/S_3 (рис.5). Значения дозовых факторов накопления брались из таблицы 1. Значения функции чувствительности плёнки определялись по графику на рис.1 для средней энергии рассеянного излучения и энергии первичного пучка. Поправка на чувствительность плёнки определялась как средневзвешенная величина указанных значений функции.

Минимальная энергия квантов рентгеновского и гамма-излучений, с которой необходимо их регистрировать, равна приблизительно 10 кэв. Поэтому расчёт толщины начат с энергии 10 кэв. На рис.3 (сплошные кривые) представлены расчётные отношения почернений в зависимости от толщины первого фильтра для энергий квантов 10, 15, 20 и 30 кэв. Абсолютная ошибка при измерении почернения S на денситометре ДФЭ-10 равна $\pm 0,02$ (где $S = \lg I_0/I$; I_0 - интенсивность падающего светового потока, I - интенсивность прошедшего через плёнку

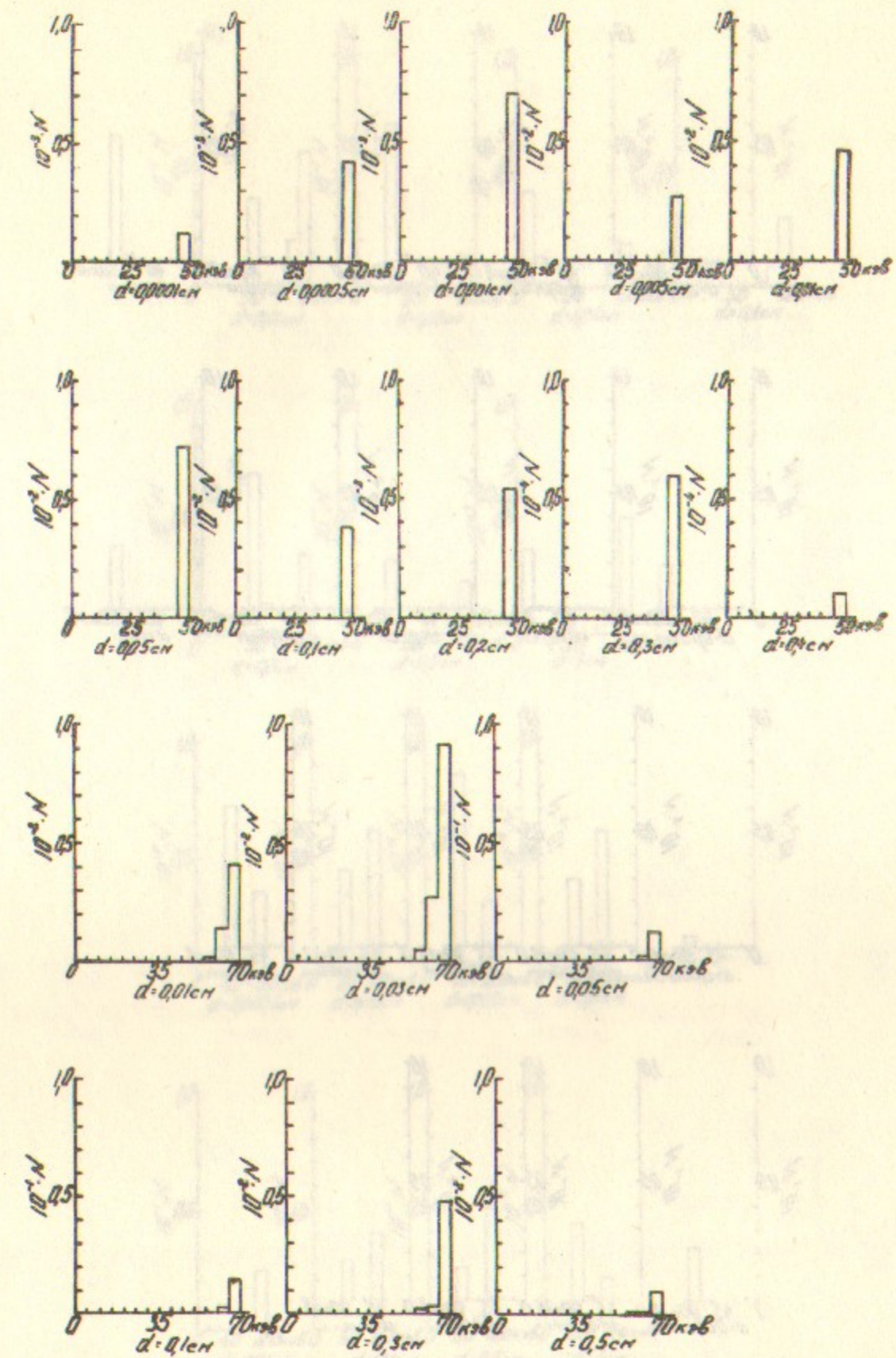


Рис.2а. Функция распределения по энергиям числа рассеянных квантов, прошедших через медный барьер, в расчёте на один первичный квант с энергией 50 и 70 кэв.

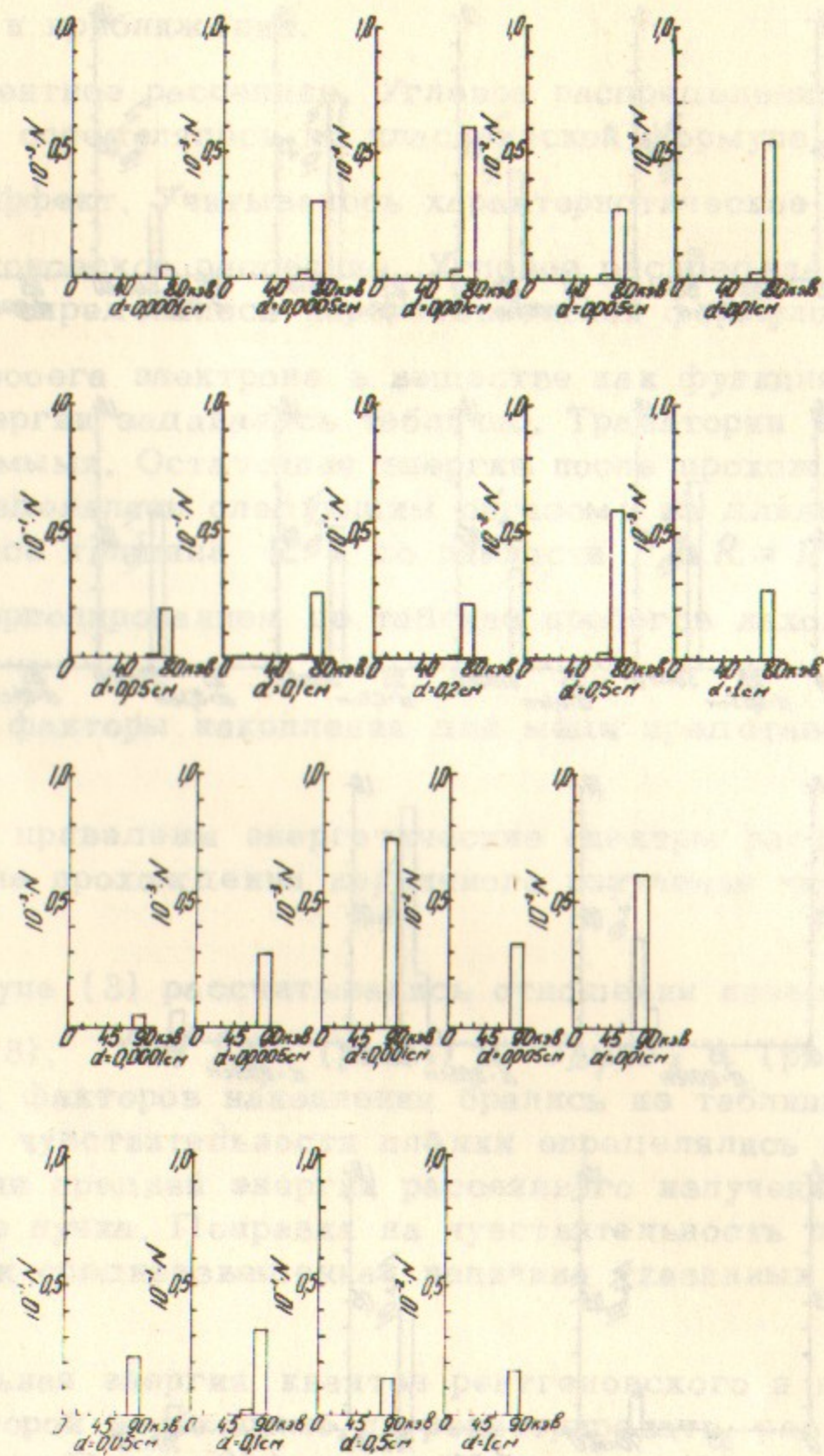


Рис.26. Функция распределения по энергиям числа рассеянных квантов, прошедших через медный барьер, в расчёте на один первичный квант с энергией 80 и 90 кэв.

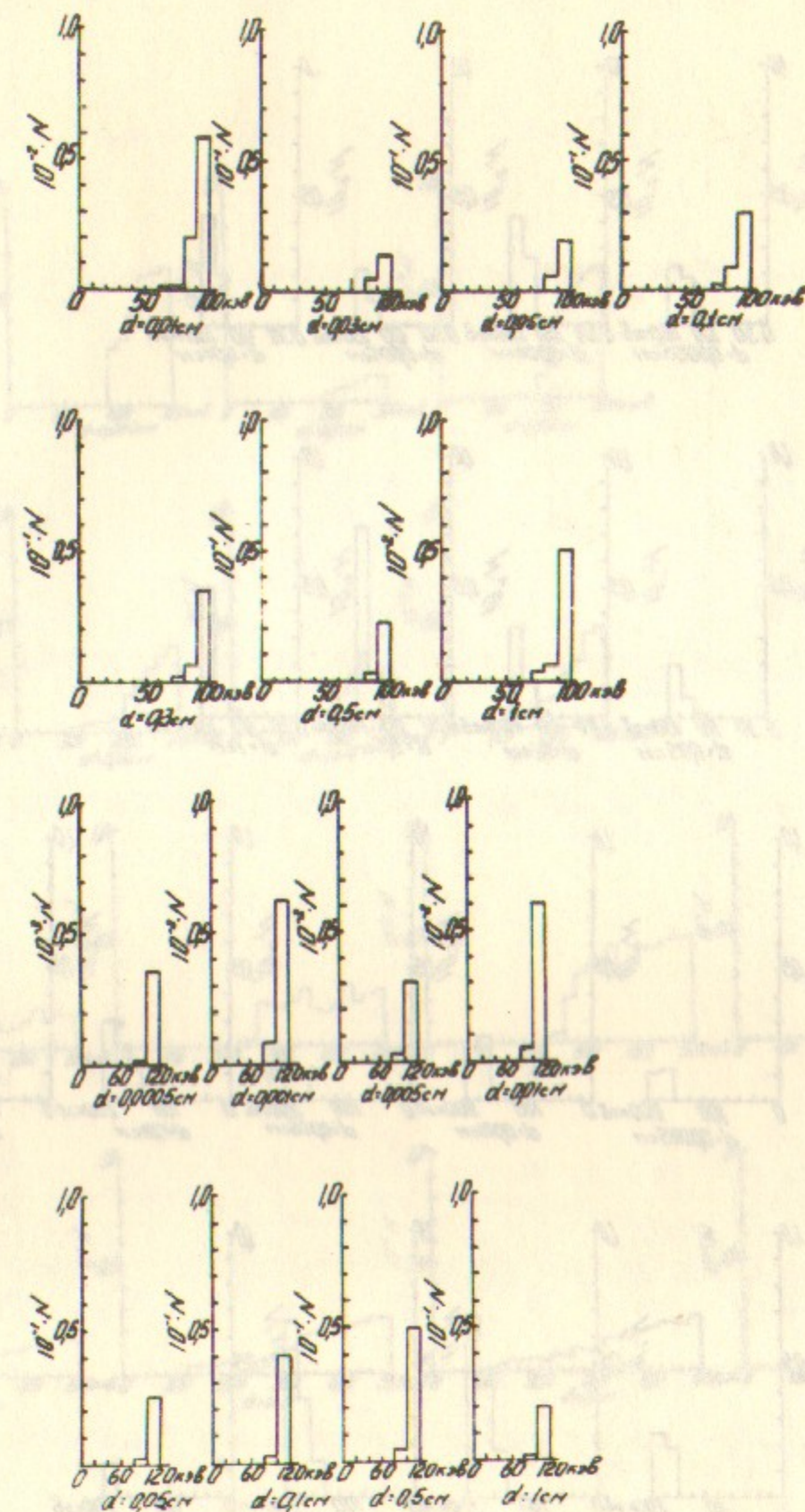


Рис.27. Функция распределения по энергиям числа рассеянных квантов, прошедших медный барьер, в расчёте на один первичный квант с энергией 100 и 120 кэв.

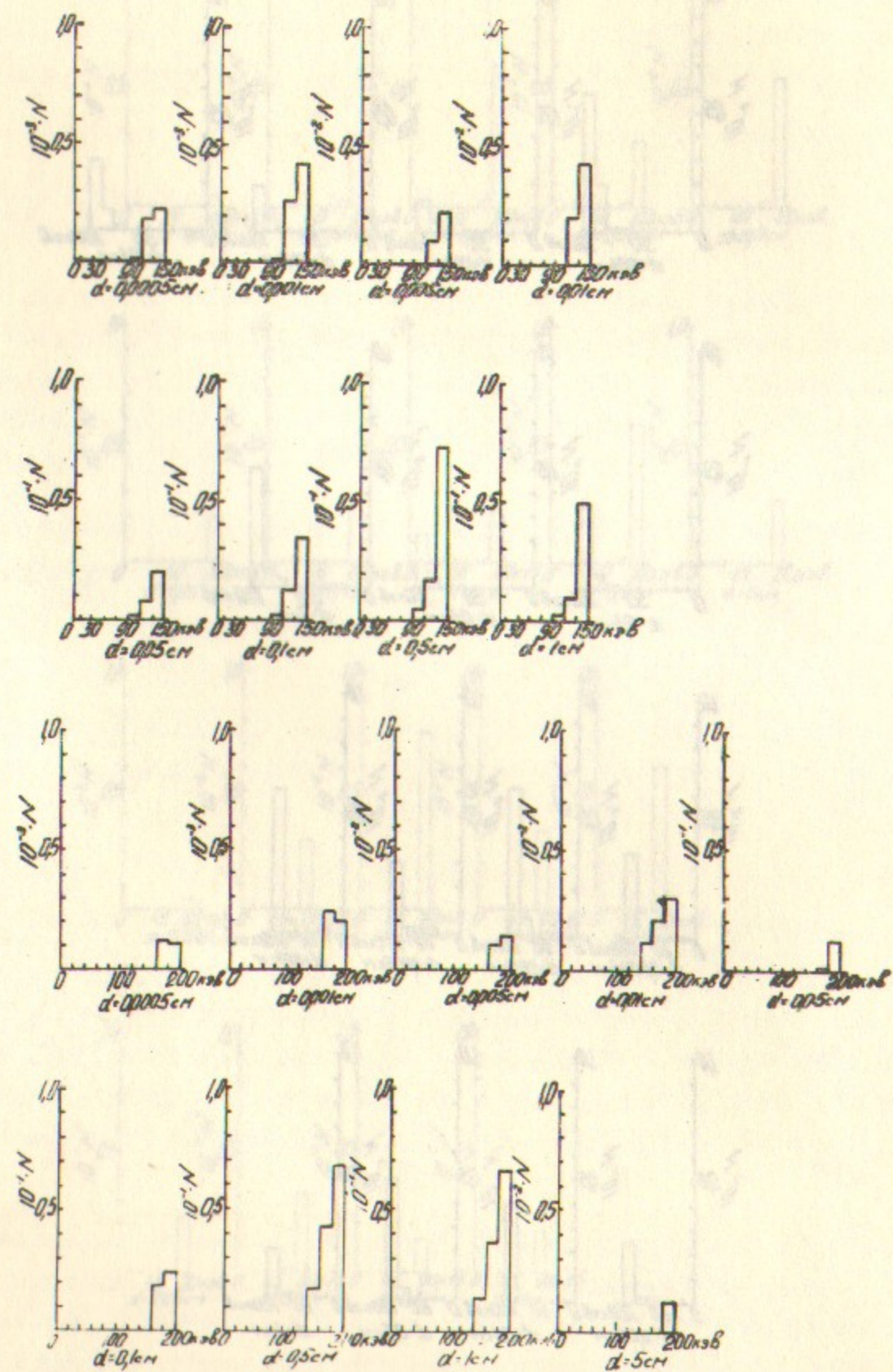


Рис.2г. Функция распределения по энергиям числа рассеянных квантов, прошедших медный барьер, в расчёте на один первичный квант с энергией 150 и 200 кэв.

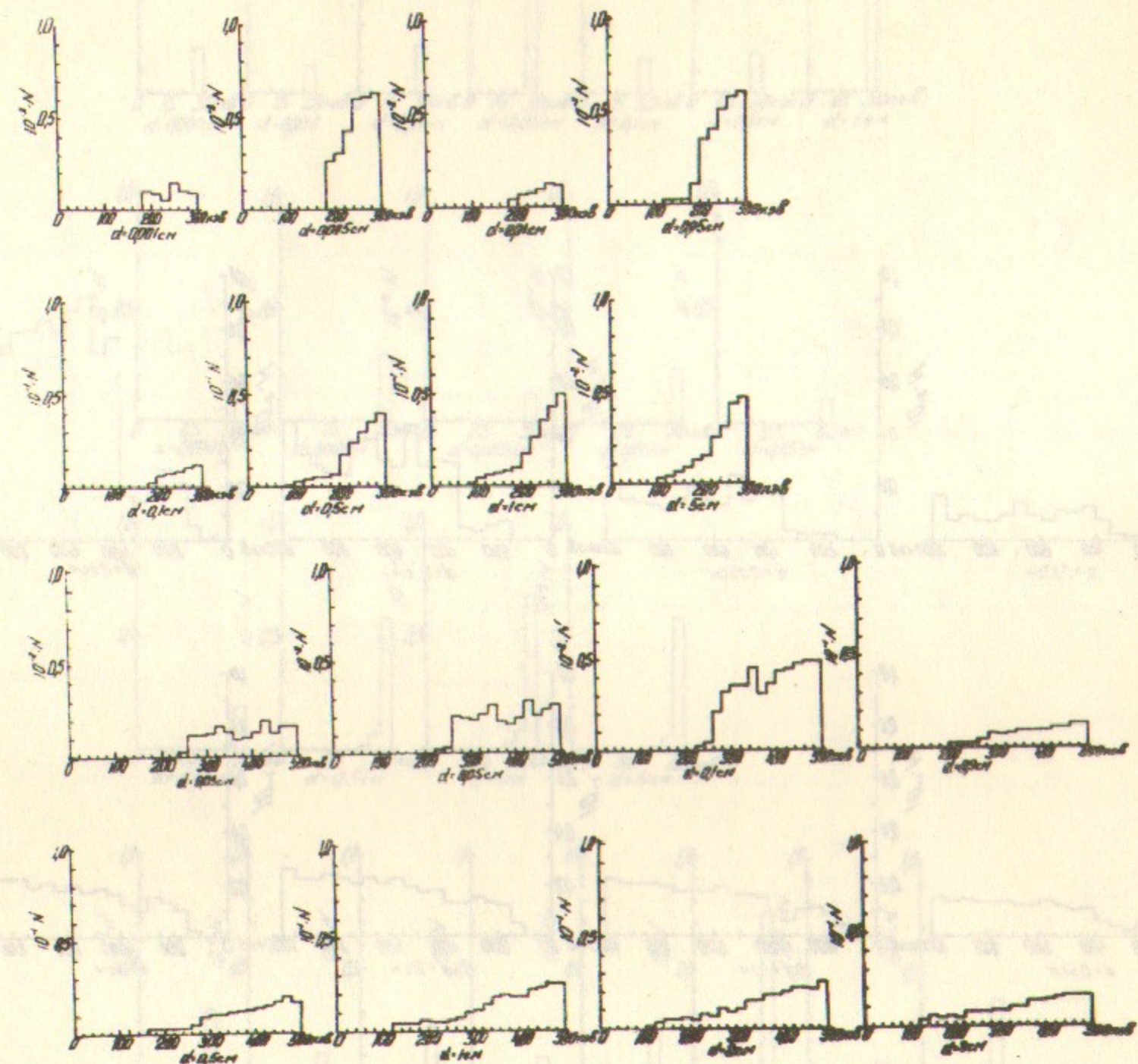


Рис.2д. Функция распределения по энергиям числа рассеянных квантов, прошедших медный барьер, в расчёте на один первичный квант с энергией 300 и 500 кэв.

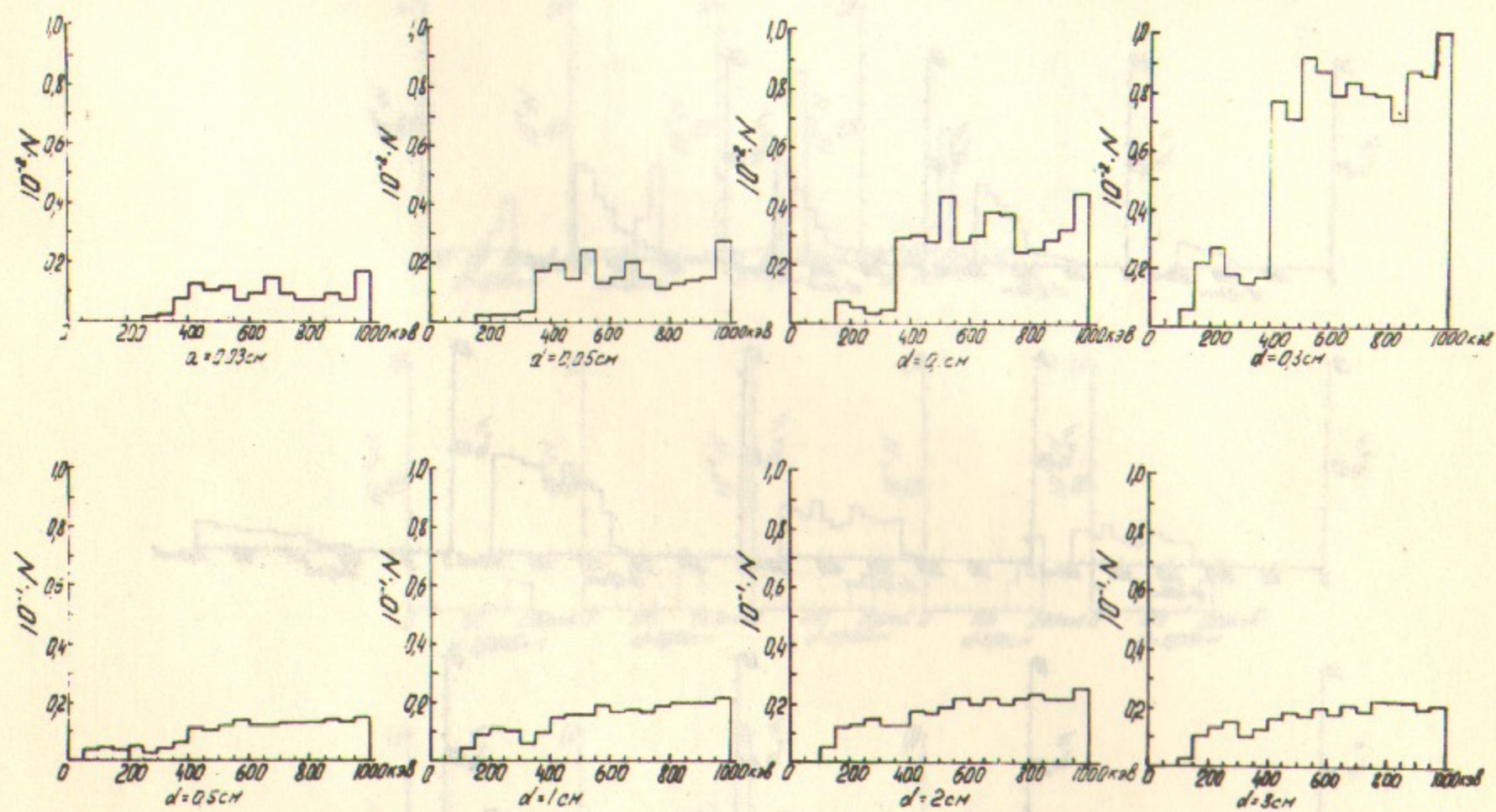


Рис.2е. Функция распределения по энергиям числа рассеянных квантов, прошедших медный барьер, в расчёте на один первичный квант с энергией 1000 кэВ.

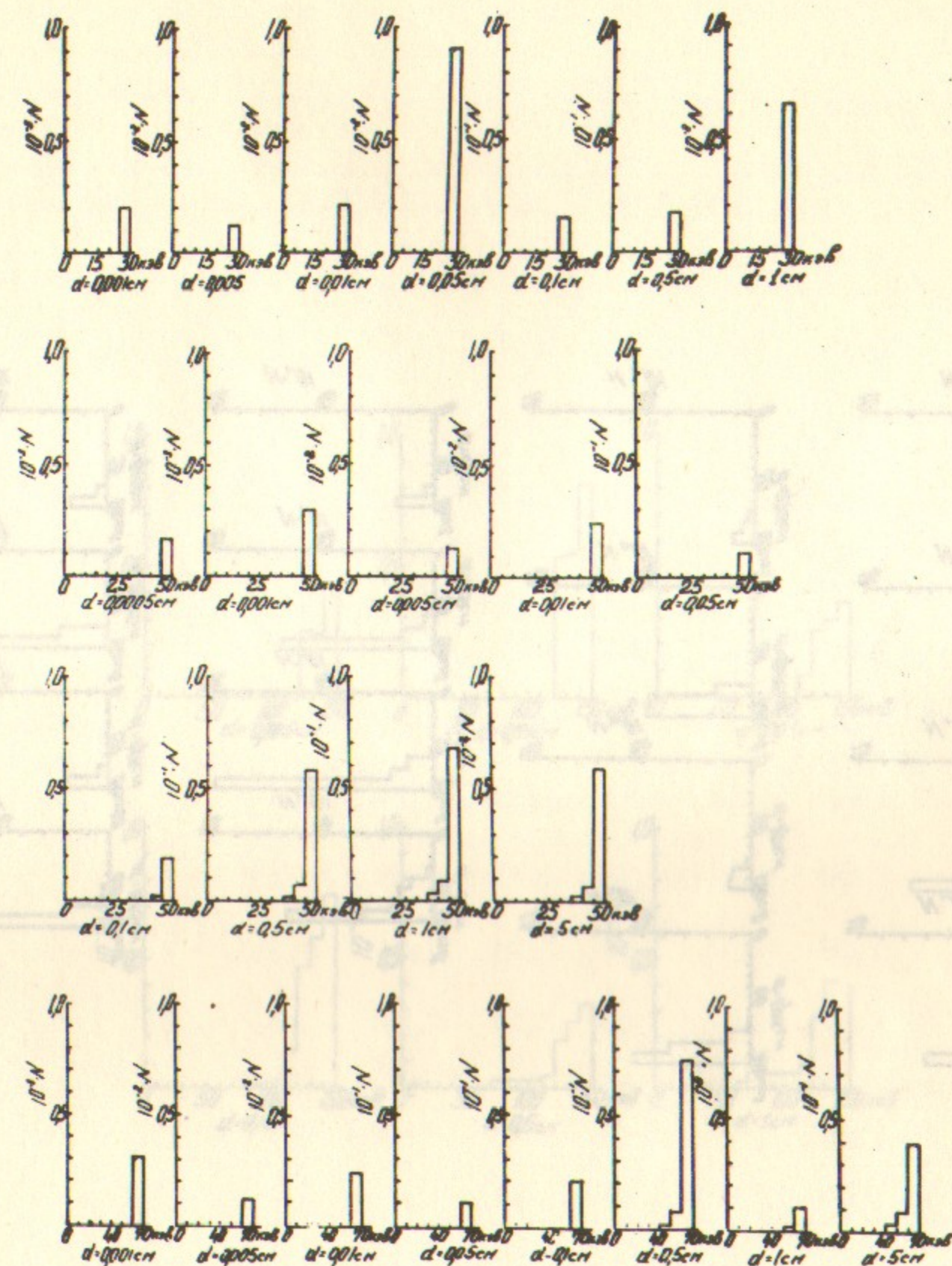


Рис.2ж. Функция распределения по энергиям числа рассеянных квантов, прошедших алюминиевый барьер, в расчёте на один первичный квант с энергией 30, 50 и 70 кэВ.

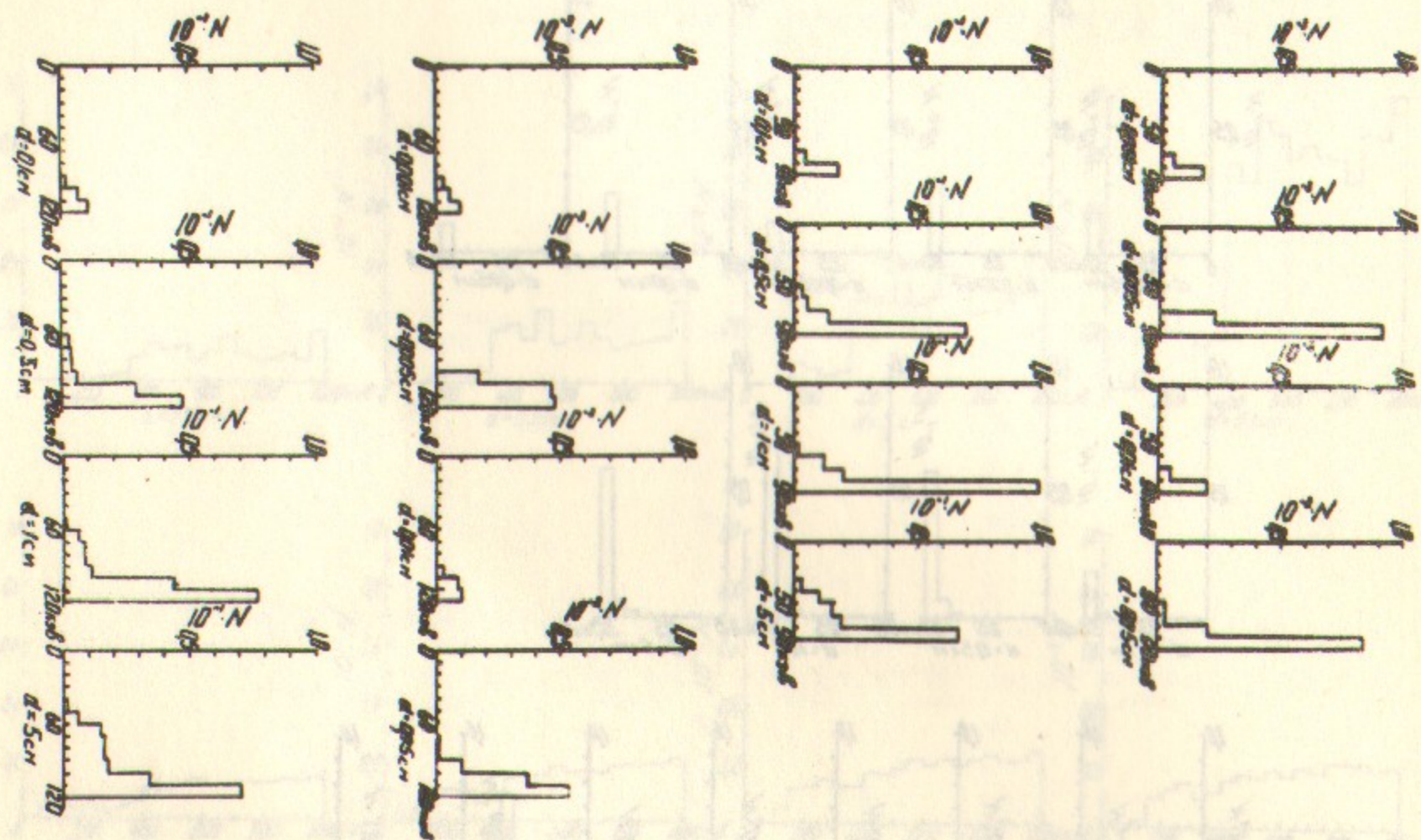


Рис.23. Функция распределения по энергиям числа рассеянных квантов, прошедших алюминиевый барьер, в расчёте на один первичный квант с энергией 90 и 120 кэв.

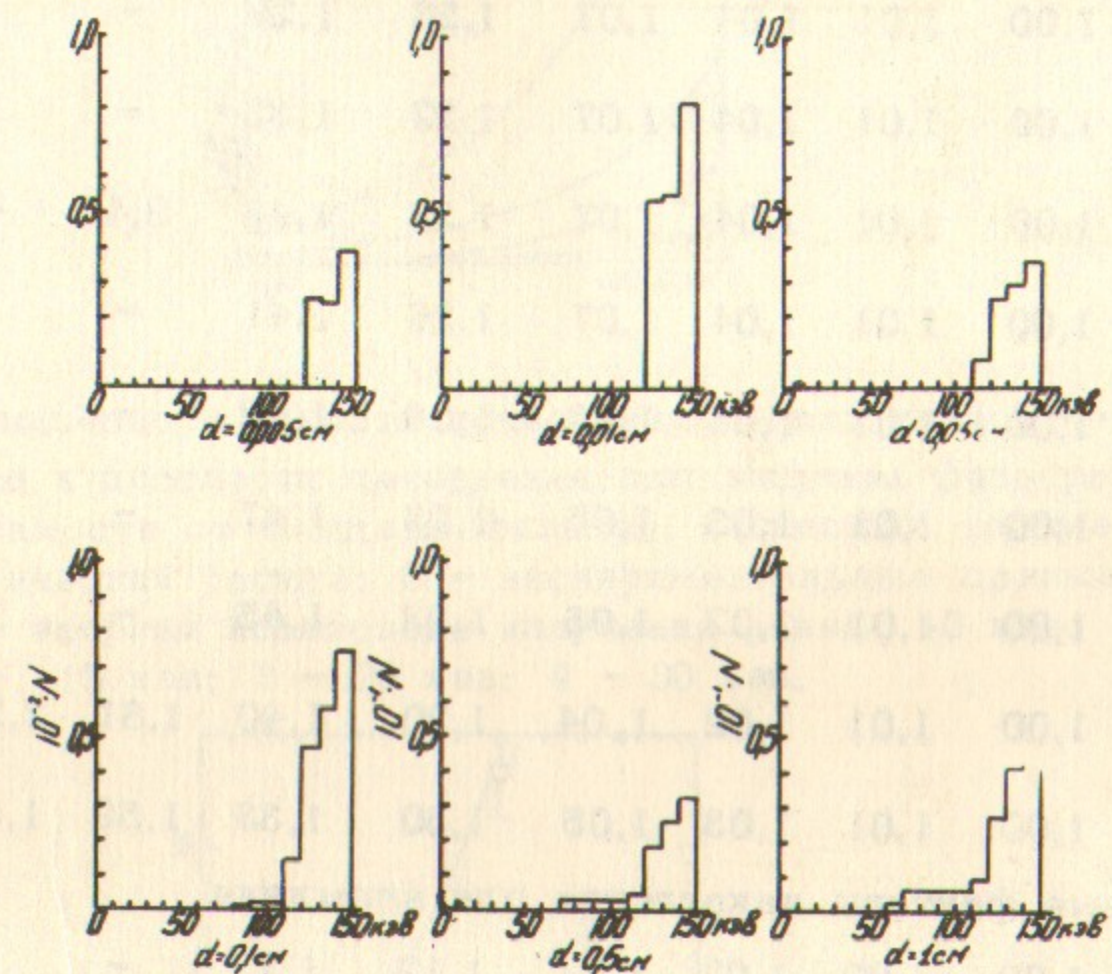


Рис.24. Функция распределения по энергиям числа рассеянных квантов, прошедших алюминиевый барьер, в расчёте на один первичный квант с энергией 150 кэв.

Таблица 1

Дозовые факторы накопления для меди

Энергия, кэВ	Толщина фильтра, см.								
	0,005	0,01	0,05	0,1	0,5	1	2	3	5
50	1,01	1,01	1,04	1,07	1,16	-	-	-	-
80	1,00	1,01	1,04	1,07	1,23	1,29	-	-	-
90	1,00	1,01	1,04	1,07	1,22	1,33	-	-	-
100	1,00	1,01	1,04	1,07	1,23	1,46	2,4	-	-
120	1,00	1,01	1,04	1,07	1,26	1,41	-	-	-
150	1,00	1,01	1,03	1,06	1,26	1,46	-	-	2,7
200	1,00	1,01	1,03	1,05	1,23	1,47	-	-	2,88
300	1,00	1,01	1,02	1,05	1,23	1,45	-	-	3,29
500	1,00	1,01	1,02	1,04	1,20	1,40	1,81	2,20	-
1000	1,00	1,01	1,03	1,05	1,30	1,33	1,59	1,9	-
Дозовые факторы накопления для алюминия.									
30	1,00	1,00	1,02	1,03	1,12	1,2	-	-	-
50	1,00	1,00	1,02	1,03	1,14	1,26	-	-	2,0
70	1,00	1,00	1,01	1,03	1,12	1,25	-	-	2,18
90	1,00	1,00	1,01	1,02	1,11	1,23	-	-	2,25
120	1,00	1,00	1,01	1,02	1,11	1,21	-	-	2,22
150	1,00	1,00	1,01	1,02	1,1	1,2	-	-	-

светового потока). Если мы хотим определить энергию рентгеновского излучения по поглощению в фильтре, то нам необходимо иметь почернение под фильтром не менее $0,02 \times 3 \div 4 / 9$, т.е. минимальное почернение под фильтром может быть $0,06 \div 0,08$. В этом случае погрешность прибора не будет иметь определяющее значение.

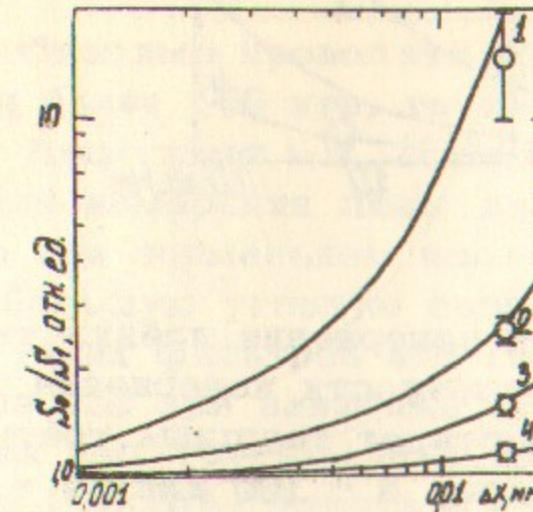


Рис.3. Отношение плотности почернения плёнки типа РМ-5-1 в окне к плотности почернения под медным фильтром в зависимости от толщины фильтра. Сплошные кривые - теоретический расчёт; 0 - экспериментальные данные; 1 - энергия квантового излучения равна 10 кэВ; 2 - 15 кэВ; 3 - 20 кэВ; 4 - 30 кэВ.

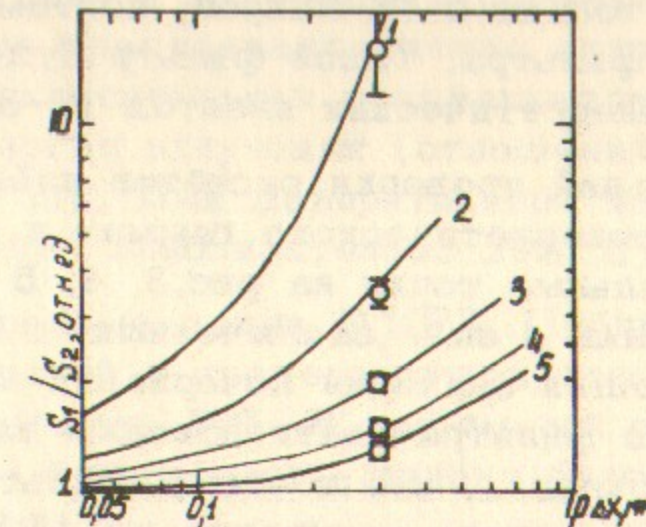


Рис.4. Отношение плотности почернения плёнки типа РМ-5-1 под первым фильтром к плотности почернения под вторым фильтром в зависимости от толщины второго фильтра. 1 - 30 кэВ; 2 - 40 кэВ; 3 - 50 кэВ; 4 - 60 кэВ; 5 - 70 кэВ.

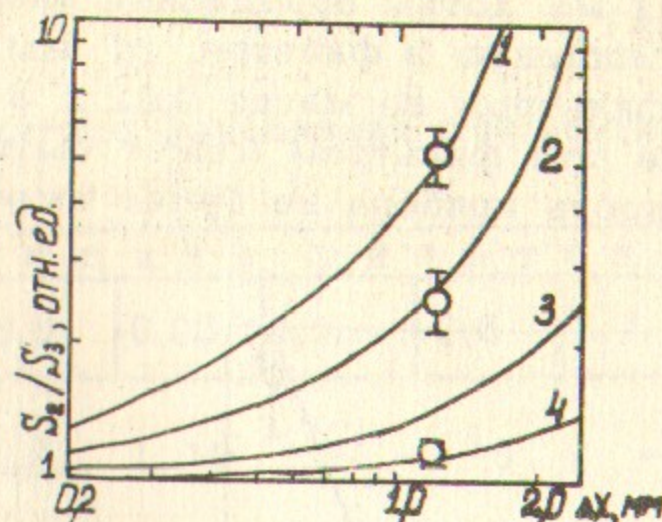


Рис.5. Отношение плотности почернения плёнки типа РМ-5-1 под вторым фильтром к плотности почернения под третьим фильтром в зависимости от толщины третьего фильтра. 1 - 60 кэв; 2 - 70 кэв; 3 - 100 кэв; 4 - 141 кэв.

Фотодозиметры выдаются персоналу обычно на месячный срок (предельно-допустимая доза около 400 мр). Почернение в окне при дозе 100 мр и энергии излучения 10 кэв приблизительно равно 0,5. Для дозы 400 мр почернение в окне приблизительно равно 2,0, а под фильтром в зависимости от его толщины может быть 0,06 и более. Такому требованию соответствует медный фильтр толщиной от 1 до 12 микрон. Промышленность выпускает медную фольгу начиная только с 15 микрон, поэтому эта толщина и взята для первого фильтра. Такой фильтр будет работать в интервале энергий моноэнергетических квантов 10-30 кэв.

Для экспериментальной проверки расчётов плёнки облучались различными дозами моноэнергетического гамма- и рентгеновского излучения. Экспериментальные точки на рис.3, 4, 5 получены для значений почернений плёнки в окне, заключённых в интервале 1,0 - 2,0 и соответствующих значений почернений под фильтрами. Проверка работы первого фильтра рентгеновским излучением с эффективной энергией показала, что по этому фильтру можно определять энергию рентгеновского излучения до 45 кэв.

Аналогичные рассуждения были сделаны при расчёте второго фильтра. Необходимые значения ΔX (рис.4) заключены в интервале 0,2 - 0,3 мм. Так как толщина X_2 второго фильтра связана с толщиной X_1 первого фильтра выражением $\Delta X = X_2 - X_1$

то учитывая стандартные толщины меди, второй фильтр лучше взять 0,3 мм. Вторым фильтром будет работать в интервале энергий моноэнергетических квантов от 30 до 70 кэв.

Толщина третьего фильтра (рис.5) выбрана 1,5 мм. Третий фильтр будет работать в интервале моноэнергетических квантов 60 - 150 кэв.

Если нам необходимо проводить оценку дозы с учётом эффективной энергии более 150 кэв, то толщины медных фильтров будут измеряться десятками мм. Кассета с такими фильтрами будет пригодна для измерения дозы рентгеновского и гамма-излучений только при нормальном падении излучения, так как она будет иметь большую угловую зависимость чувствительности. Но в применении таких фильтров нет необходимости. При энергиях квантов более 150 кэв зависимость почернения плёнки РМ-5-1 от энергии под третьим фильтром носит приблизительно линейный характер ($\pm 25\%$) вплоть до энергии 1250 кэв.

При градуировании плёнки ^{PM-5-1} рентгеновским излучением с энергией квантов 10 кэв и дозе 400 мр получены следующие почернения плёнки в окне, за вычетом вуали: $S_0^{(1)} = 1,96$; $S_0^{(2)} = 1,88$; $S_0^{(3)} = 1,89$; $S_0^{(4)} = 1,85$; $S_0^{(5)} = 1,86$; $S_0^{(6)} = 1,89$; $S_0^{(7)} = 1,9$; $S_0^{(8)} = 1,87$; $S_0^{(9)} = 1,92$; $S_0^{(10)} = 1,9$. Аналогично для почернения под первым фильтром: 0,11; 0,12; 0,11; 0,12; 0,13; 0,1; 0,13; 0,1; 0,11; 0,1. Среднеарифметическое значение почернений плёнки в окне и под первым фильтром равно 1,902 и 0,113 и соответственно среднеквадратичные отклонения равны 0,044 и 0,038. Отсюда относительная среднеквадратичная погрешность определения энергии излучения (отношения почернений) равна приблизительно 33%. Для доверительной вероятности, равной 0,88 /10/ ошибка будет приблизительно 29%, а для 0,999 - 50%.

Согласно рекомендации МКРЗ, Публикация 12, при определении дозы, близкой к предельно-допустимой, неопределённость не должна превышать 50%. В нашем же случае на 1000 измерений только одно будет иметь ошибку более 50%, что можно считать допустимым.

Ошибка в определении энергии обусловлена в основном не большой точностью нахождения почернения под фильтром. Поэтому найдем доверительные интервалы для дозы 400 мр и среднего значения почернения под фильтром 0,113. Из таблицы

коэффициентов Стьюдента для 0,999 доверительной вероятности имеем - 4,8. Отсюда по формуле $\Delta X = \frac{t_{\Delta n} S_n}{\sqrt{n}}$, где $t_{\Delta n}$ - коэффициент Стьюдента, S_n - среднеквадратичная ошибка, n - число измерений находим, что интервал равен $\pm 0,058$, т.е. $0,055 < 0,113 < 0,171$. Округляя, получим $0,06 < 0,113 < 0,17$, т.е. значения доверительного интервала не выходят за установленные нами ранее границы.

Вычисления для энергии квантов 12 кэв и дозе 400 мр дают относительную среднеквадратичную погрешность, равную 24% для доверительной вероятности 0,999 при определении энергии излучения. Относительная среднеквадратичная погрешность определения энергии рентгеновского излучения в конце диапазона (30 кэв) по первому фильтру равна приблизительно 2% - 24% для доз 100-10 мр и доверительной вероятности 0,999.

Таким образом, используя медный фильтр толщиной 15 микрон, предельно-допустимую месячную дозу рентгеновского излучения с энергией квантов 10 кэв можно определить с допустимой для практики точностью. Дозы, большие 400 мр будут определяться с меньшей погрешностью. Кроме того, на практике в подавляющем большинстве случаев приходится иметь дело с эффективной энергией рентгеновского и гамма-излучений и ошибка в определении отношений будет значительно меньше, так как почернение под фильтром будет больше при одинаковых с моноэнергетическим излучением дозах. Большее почернение обусловлено присутствием в спектре рентгеновского излучения квантов с энергией большей 10 кэв.

Диапазон регистрируемых доз плёнкой РМ-5-1 при использовании денситометра ДФЭ-10 и вуали равной 0,3, а также среднеквадратичные ошибки определения дозы приведены в табл. 9.

Режим проявления плёнок следующий:

- а) проявление при температуре проявителя 18°C - 10 минут;
- б) споласкивание дистиллированной водой - 2 минуты;
- в) фиксирование при комнатной температуре - 20 минут;
- г) промывка в дистиллированной воде - 15 минут.

Состав проявителя:

1. Вода дистиллированная - 750 мл.
2. Метол - 1 гр.
3. Сульфат натрия безводный - 26 г.
4. Гидрохинон - 5 г.
5. Сода безводная - 20 г.
6. Калий бромистый (10% раствор) - 10 мл.
7. Вода дистиллированная до - 1000 мл.

Состав фиксажа:

1. Натрий серноватисто-кислый кристаллический - 260 г.
2. Аммоний хлористый - 50 г.
3. Метабисульфит натрия - 16 г.
4. Вода дистиллированная до - 1 л.

В трех литрах проявителя обрабатывается не более 250 плёнок РМ-5-1. Проявитель используется только один раз, независимо от того, проявляется 250 плёнок или меньше. Реактивы для рабочих растворов используются только марки ч.д.а. Строго выдерживается режим обработки.

В течение 8 лет проводилось облучение контрольных плёнок 1-3 раза в месяц. После обработки плёнок строился график зависимости плотности почернения от дозы. Сопоставление графиков между собой показывает, что среднеквадратичное отклонение графиков от графика, проведенного по средним значениям, не превышает $\pm 5\%$. На основании этого был сделан вывод, что нет необходимости каждый раз проводить облучение контрольных плёнок, а можно ограничиться только проверкой каждой новой партии плёнок.

На основании расчётов была разработана и изготовлена из капрона кассета с тремя медными фильтрами под дозиметрические плёнки в стандартной упаковке. Толщина фильтров равна 0,015, 0,3 и 1,5 мм. Методика определения дозы излучения фотодозиметром с медными фильтрами описана в работе /11/.

§ 3. Угловая зависимость чувствительности фотодозиметров

Использование фотодозиметров в практике индивидуально-го контроля связано с облучением их под различными углами. При этом эффективная толщина фильтров в кассете будет различной для разных углов падения излучения. Знание зависимости чувствительности от угла падения излучения позволит избежать грубых ошибок при определении дозы облучения.

Зависимость чувствительности фотодозиметра от угла падения определялась экспериментально. Фотодозиметры облучались под углами 0° (нормальное падение), 10° , 20° , 45° , 70° и 90° рентгеновским излучением с эффективной энергией и гамма-излучением цезия - 137. Результаты эксперимента представлены на рис. 6.

Чувствительность открытой плёнки (окно) с увеличением угла падения излучения приблизительно до 45° увеличивается практически для всех энергий квантов, а затем начинает уменьшаться (рис. 6а). Такое изменение чувствительности плёнки можно объяснить тем, что увеличивается эффективная толщина эмульсии с увеличением угла падения. При этом, сначала число взаимодействующих с эмульсией квантов растёт, а затем при дальнейшем увеличении угла падения вследствие ослабления их уменьшается. Кроме того, необходимо принять во внимание, что с увеличением угла падения увеличивается толщина упаковки плёнки. Для энергий квантов 10-20 кэВ при больших углах падения ослабление излучения упаковкой будет существенным 10-20% и более. За счёт этих эффектов чувствительность плёнки РМ-5-1 при эффективной энергии рентгеновского излучения при угле падения близком к 90° составляет приблизительно 0,35 от чувствительности при нормальном падении. С увеличением энергии излучения, когда средняя длина свободного пробега квантов становится много больше эффективной толщины эмульсии и упаковки увеличения чувствительности не наблюдается. Небольшое уменьшение чувствительности плёнки при больших углах падения излучения можно объяснить ослаблением излучения фильтрами, т.к. источник излучения имел не параллельный пучок квантов.

Представляет интерес рассмотрение изменения почернения плёнки при увеличении угла падения излучения на неё с точки

зрения электронного равновесия. Если поток излучения падает на вещество, то с увеличением толщины вещества нарастает ионизация и её максимум будет на толщине, где устанавливается электронное равновесие. Для того, чтобы электронное равновесие с дальнейшим увеличением толщины существовало, необходимо, чтобы ослабление первичного излучения было пренебрежимо мало на расстоянии, равном среднему пробегу вторичных электронов. Это условие для плёнки не выполняется. Поэтому при изменении угла падения сначала наблюдается увеличение почернения, а затем его уменьшение.

Анализируя данные рис. 6 приходим к выводу, что при определении дозы излучения по первому фильтру при углах падения больших 90° мы всегда будем получать завышенную дозу. Так как отношения почернений в окне и под первым фильтром будут с увеличением угла увеличиваться, то эффективная энергия, определенная по этим отношениям, будет меньше истинной. С уменьшением энергии поправочный коэффициент увеличивается в области энергии квантов до 35 кэВ. Если энергия излучения более 35 кэВ, то при увеличении угла падения, энергия и доза излучения будут занижаться.

При углах падения $0^\circ - 20^\circ$ при нахождении дозы излучения угловой зависимостью чувствительности фотодозиметра можно пренебречь. При больших углах падения излучения необходимо вводить угловую поправку в полученную дозу, в диапазоне энергий квантов 10-100 кэВ. При более высоких энергиях излучения поправки можно не вводить, так как ошибка при определении дозы за счёт изменения чувствительности не будет превышать 10%.

Методика введения угловых поправок несложна. По теневой картине на плёнке оценивают угол падения излучения и затем используя данные рис. 6 находят истинное почернение плёнки под данным фильтром и в окне. Нахождение поправок увеличивает трудоёмкость и вносит дополнительную сложность в обработку фотодозиметров. Проведенный нами анализ результатов более 20000 индивидуальных фотодозиметров, находившихся у персонала, работающего в самых различных условиях, показывает, что только приблизительно 1-2% фотодозиметров от общего количества требуют введения поправок и изучения условий, при которых произошло облучение. Такое небольшое количество фотодозиметров не займет много времени у персонала, занимающегося их обработкой.

Таблица 2

Диапазоны доз, регистрируемых плёнкой РМ-5-1

E, кэВ	Диапазон доз, рентген	Среднеквадратичная ошибка определения дозы на краях диапазона для доверительной вероятности 0,999	
		%	
10	0,1 - 0,7	76	23
15	0,01 - 0,25	41	12
20	0,005 - 0,2	30	11
30	0,002 - 0,09	38	5
40	0,003 - 0,13	32	5
50	0,005 - 0,15	44	5
60	0,01 - 0,2	39	4
100	0,02 - 0,5	27	6
150	0,03 - 0,7	20	6
279	0,05 - 1,0	22	4
661	0,1 - 2,5	28	5
1250	0,1 - 2,5	27	5

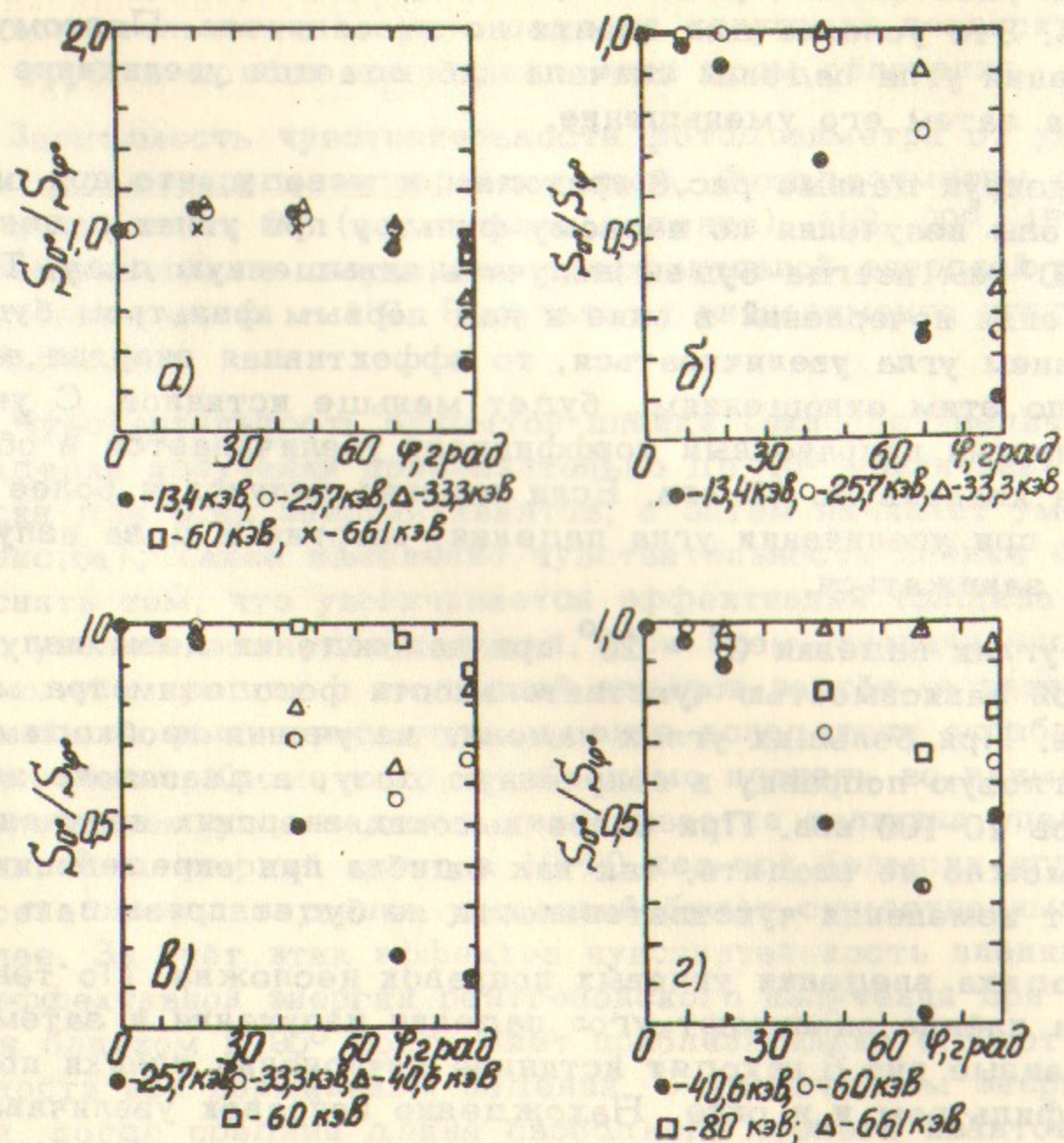


Рис.6. Зависимость чувствительности фотодозиметра от угла падения квантового излучения.
 а) окно; б) медный фильтр толщиной 0,015 мм;
 в) медный фильтр толщиной 0,3 мм;
 г) медный фильтр толщиной 1,5 мм.

Таблица 3

Диапазоны доз рентгеновского и гамма-излучений,
регистрируемых плёнками типа КН-1 и А-2

E _{эфф} , кэв	Диапазоны доз, рентгены		Коэффициенты пропуска- ния для	
	КН-1	А-2	E _{эфф}	E моно
10	0,5 - 60	15 - 850	0,5	0,625
13,4	0,4 - 50	10 - 610	0,67	0,819
17,6	0,3 - 40	5 - 420	0,74	0,811
25,7	0,2 - 25	0,8 - 150	0,87	0,918
33,3	0,1 - 17	0,3 - 100	0,80	0,896
40,6	0,1 - 17	0,9 - 140	0,94	0,938
50	0,17 - 20	1,2 - 150	0,96	0,961
60	0,2 - 25	2 - 190	0,97	0,978
80	0,3 - 40	3 - 300	0,98	0,987
279	2 - 160	18 - 1300	0,997	0,997
661	3 - 180	20 - 1800	1	1
1250	3 - 180	20 - 1800	1	1

Итак, фотодозиметр с тремя медными фильтрами обеспе-
чивает с достаточной для практики точностью измерение доз
рентгеновского и гамма-излучений в диапазоне энергий квантов
от 10 до 1250 кэв.

§ 4. Расширение диапазона доз, регистрируемых фотодозиметром

Как показано в предыдущем параграфе, диапазон доз, ре-
гистрируемых дозиметром на основе плёнки РМ-5-1, невелик.
В практике часто бывает необходимость регистрировать гораздо
большие дозы. Одним из способов увеличения диапазона доз
является способ ослабления плотности почернения плёнки при об-
лучении её большими дозами. Проведенные нами эксперименты
с плёнкой типа РМ-5-1 по ослаблению плотности почернения по-
казали, что диапазон доз в этом случае может быть увеличен
в 3-5 раз в области энергий квантов более 150 кэв. При энер-
гии излучения менее 150 кэв этот способ применять нельзя. При
больших дозах зависимость между дозой облучения и плот-
ностью почернения плёнки носит нелинейный характер, поэтому
при ослаблении плотности почернения линейным ослаблением на-
рушается соотношение между почернениями (отношение почер-
нений или доз после ослабления увеличивается).

При другом способе увеличения диапазона доз, регистри-
руемых фотодозиметром, применяют одновременно две, три
плёнки с разной чувствительностью. В этом случае диапазон доз
может быть выбран от нескольких миллирентген до нескольких
сотен рентген. Плёнки подбираются таким образом, чтобы при
максимально-возможной дозе для первой плёнки, можно было
бы определить минимальную дозу на следующей и т.д.

Для этих целей нами было исследовано несколько типов
плёнок. В результате этих исследований найдено, что комбина-
ция из трех плёнок типа РМ-5-1, КН-1 и А-2 (дубль-негатив-
ная) перекрывает диапазон доз приблизительно от 2 мр до 100р
при энергии излучения около 40 кэв и от 100 мр до 1800 р. при
энергии излучения 1250 кэв.

Плёнки типа КН-1 и А-2 помещались в стандартную для
дозиметрической плёнки типа РМ-5-1 упаковку и облучались на

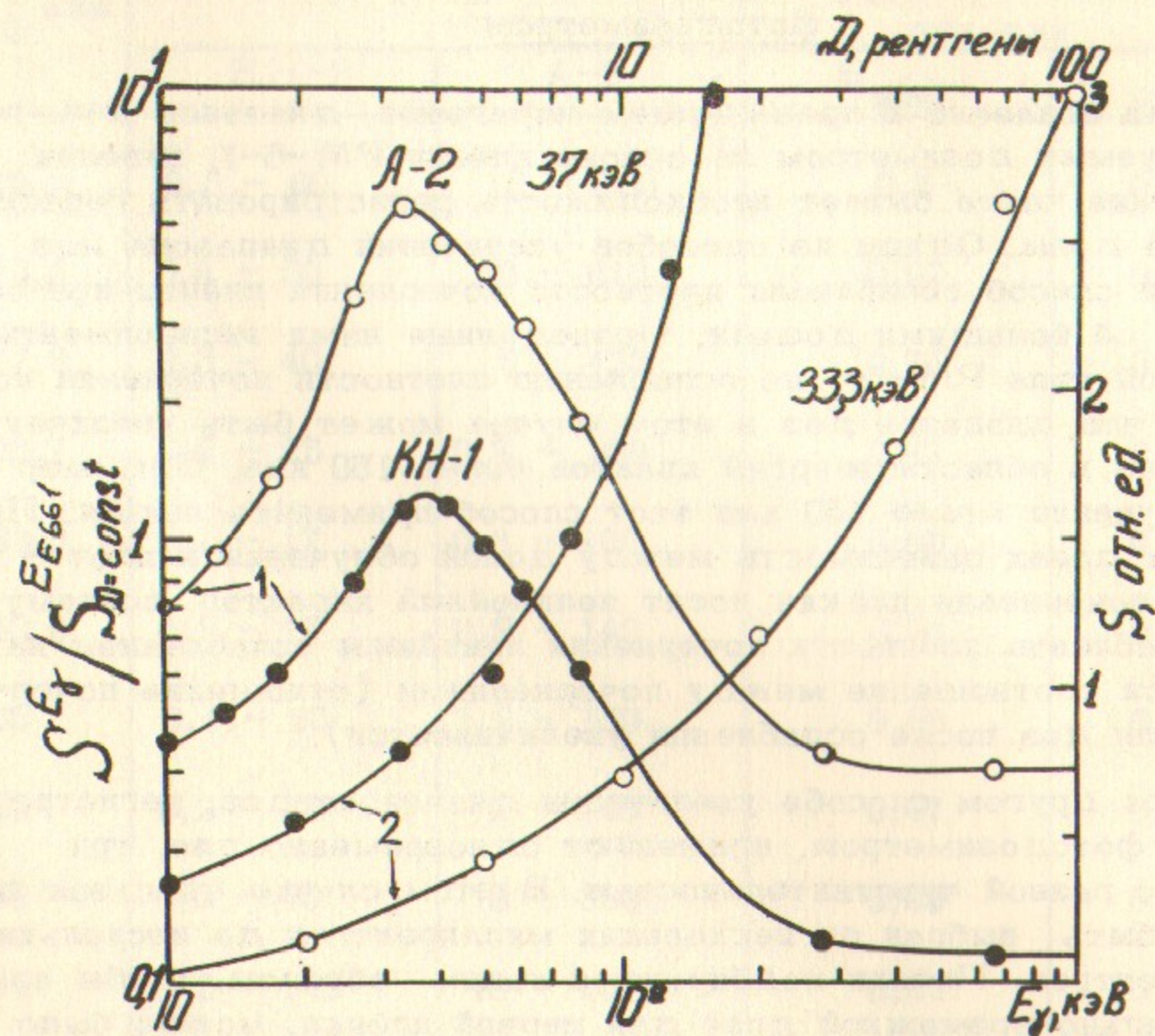


Рис.7. 1 - зависимость плотности почернения плёнки типа А-2 (дубль-негативная) и типа КН-1 от энергии квантового излучения при постоянной дозе. (Ось ординат - левая; ось абсцисс - нижняя). 2 - зависимость плотности почернения плёнок типа А-2 (дубль-негативная) и типа КН-1 от дозы рентгеновского излучения (ось ординат - правая; ось абсцисс - верхняя).

рентгеновской установке и гамма-излучением радиоактивных источников. Дозы облучения рентгеновского излучения измерялись нормальной камерой, а от излучения изотопов находились расчётным путем. В результате этих экспериментов был найден ход с жесткостью плёнок (рис.7) и установлена зависимость плотности почернения от величины дозы. Диапазоны доз рентгеновского и гамма-излучений, регистрируемых плёнками типа КН-1 и А-2 даны в табл.3.

Методика проведения дозиметрического контроля фотодозиметром довольно проста. Персоналу выдается фотодозиметр, заряженный тремя плёнками. Плёнка типа РМ-5-1 в стандартной упаковке ложится сверху (к окну), а плёнки типа КН-1 и А-2 совместно в такой же упаковке - снизу. Раз в месяц плёнка типа РМ-5-1 сдаётся в обработку и если окажется, что определить дозу из-за большого почернения плёнки нельзя, то обрабатывают плёнки типа КН-1 и А-2 и по ним определяют дозу облучения. Плёнки типа КН-1 и А-2 носят в течение года, а затем заменяют на новые. Процессы обработки плёнок типа КН-1 и А-2 и определение дозы такие же, как и для плёнки типа РМ-5-1. После нахождения дозы облучения по плёнкам типа КН-1 или А-2 необходимо вносить поправку в величину дозы, которая меньше истинной, так как излучение ослабляется плёнкой типа РМ-5-1. Поправки в виде коэффициентов пропускания (табл.3) для эффективной энергии излучения находились экспериментальным путем, а для моноэнергетического - расчётным.

Возможность определения годовой и аварийной дозы облучения представляет большой интерес для радиационной гигиены. Годовые данные дозиметрии позволяют объективно интерпретировать результаты профилактических медицинских осмотров, а знание эффективной энергии излучения и величины дозы, полученной в результате аварии или при нарушении правил работы в зоне ионизирующего излучения, дают возможность провести необходимый комплекс медицинских мероприятий.

В результате проведенных исследований приходим к выводу, что применение фотографического метода в дозиметрии рентгеновского излучения с энергией квантов менее 50 кэВ возможно с достаточной для практики точностью. Кроме того, предложенная методика даёт возможность расширить энергетический диапазон применимости метода до энергии квантов 1250 кэВ. В фотодози-

метре применены широко распространенные отечественные плёнки и медные фильтры стандартной толщины, чем достигается простота изготовления и применения дозиметра на практике. Достаточно большой диапазон доз, регистрируемых фотодозиметром, в сочетании с автоматической обработкой результатов измерений позволяют надеяться, что предложенная методика найдёт широкое применение в научных исследованиях, медицине и других областях народного хозяйства при измерениях доз рентгеновского и гамма-излучений.

Л и т е р а т у р а

1. Д.Грининг. В сб. "Фотографическая регистрация ионизирующих излучений. ИЛ, М., (1953), стр.28-45.
2. Б.Прайс и др. Защита от ядерных излучений. ИЛ, М., (1959), стр.54.
3. С.В.Стародубцев, А.М.Романов. Взаимодействие гамма-излучения с веществом. Часть 1. Изд. "Наука", Узбекской ССР, Ташкент (1964).
4. В.Ф.Козлов. Фотографическая дозиметрия ионизирующих излучений. Атомиздат, М., (1964).
5. К.К.Аглинцев. Дозиметрия ионизирующих излучений. Госатомиздат, М., (1957).
6. Р.В.Ставицкий и др. "Атомная энергия", том 29, вып.5(1970), стр.366.
7. Ю.А.Казанский и др. Физические исследования защиты реакторов. Атомиздат, М., (1966).
8. Р.В.Ставицкий, Э.А.Ярковой. "Медицинская радиология", № 2, (1971), стр.61-66.
9. А.Н.Зайдель. Элементарные оценки ошибок измерений. Изд. "Наука", Л., (1967).
10. Д.Худсон. Статистика для физиков. Изд. "Мир", перевод с английского. М., (1967).
11. В.С.Григорьев, Г.М.Протопопова "Фотографическая дозиметрия рентгеновского излучения". Материалы 5-й Научно-практической конференции по радиационной гигиене, Л., 1967 г., стр.46-47.

