

**ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ
РЕГИСТРАЦИЯ
ИОНИЗИРУЮЩИХ
ИЗЛУЧЕНИЙ**

**СБОРНИК
СТАТЕЙ**

ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

СБОРНИК СТАТЕЙ

*Перевод с английского,
итальянского, немецкого
и французского*



И * Л

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва — 1953

ОТ РЕДАКЦИИ

Настоящий сборник состоит из ряда статей зарубежных ученых по вопросам методики исследований. Результаты применения различных методов рассматриваются лишь постольку, поскольку они содержатся в методических работах. Переводы статей помещены в последовательности, предусматривающей сначала ознакомление с основами фотографического процесса (механизм действия излучений и частиц, изготовление, фотографическая обработка и свойства фотослоев), а затем с методами практической работы.

Первая часть сборника — «Механизм фотографического действия ионизирующих излучений» включает пять статей (1—5). Первые две работы по фотографическому действию рентгеновских лучей (отчасти и γ -лучей) имеют практический и теоретический интерес, поскольку повышение точности фотографического метода измерения количеств рентгеновских и γ -лучей до точности ионизационных методов требует детального знания механизма их действия. Кроме того, действие фотонов, особенно высокой энергии, сводится к действию освобождаемых фотонами вторичных электронов, исследование которых представляет теоретический интерес для физики атома.

В третьей статье рассматривается принципиально важный вопрос о чувствительности отдельных эмульсионных микрокристаллов к электронам. Ценность этой работы заключается в ее экспериментальной методике, позволяющей производить прямое измерение вероятности проявления микрокристаллов.

В четвертой и пятой статьях описывается применение электронного микроскопа и электронографа для исследования структурных изменений в кристаллах бромида серебра под действием пучка электронов. Эти работы имеют большое значение для

основного вопроса научной фотографии — образования скрытого изображения.

Вторая часть — «Фотослои для регистрации ионизирующих излучений» содержит шесть статей (6—11). Статья 6 затрагивает важный технологический вопрос о возможности повышения содержания желатины без ухудшения качества ядерной эмульсии типа G5. Статья 7 интересна тем, что в ней указываются сенсibilизаторы, повышающие электронную чувствительность эмульсий. В научной литературе существование таких сенсibilизаторов подвергается сомнению. В статьях 8 и 9 предлагается способ введения в ядерную эмульсию проволочек из различных веществ для облегчения исследований ядерных расщеплений, производимых космическими лучами в элементах, не входящих в состав эмульсии. Трудность этого метода заключается в неравномерной усадке эмульсий, загруженных проволочками. Различные пути преодоления трудностей этого метода описаны в статьях 10 и 22. В статье 11 описывается новая эмульсия, предназначенная для упрощения работы по идентификации тяжелых ядер в космических лучах.

Третья часть — «Фотографическая обработка» содержит пять работ (12—16), посвященных одному из самостоятельных вопросов, связанных с практическим использованием толстослойных эмульсий. В статье 12 описан метод температурного проявления толстослойных эмульсий. Различные варианты метода описаны в статьях 14—16. В работе 13 излагаются методы повышения различающей способности эмульсии при помощи регулирования pH проявителя.

Четвертая часть — «Свойства фотослоев в процессе их применения» — включает 11 работ (17—27). Первые две статьи посвящены основному вопросу фотографического метода — различению следов частиц в ядерных эмульсиях. В статье 17 этот вопрос исследуется при помощи искусственных макетов следов и вуали, в статье 18 он исследуется на реальных следах с такими же результатами. В статье 19 на основании исследования влияния ряда факторов на длину следов в ядерных эмульсиях доказывается, что воспроизводимость измерения следов может быть доведена до 0,5%, что, по мнению автора, подтверждает количественную ценность фотографического метода для ядерной физики. В остальных

статьях (20—27) этой главы рассматриваются практически важные вопросы об усадке эмульсии при обработке и способы ее устранения, о регрессии скрытого изображения следов частиц и о различении следов в присутствии фона.

Пятый, основной, раздел — «Методы исследования и их применение» содержит 19 статей (28—46). В обзорной статье 28 рассматриваются различные вопросы, связанные с применением ядерных эмульсий — свойства эмульсий, образование следов частиц и методы их анализа. В статьях 29—32 описывается метод определения удельной ионизации частиц в эмульсии, который основан на фотометрировании следов, т. е. на измерении оптической плотности почернения, создаваемого следом. Этот метод может применяться в случаях, когда прямой счет зерен под микроскопом невозможен (область «насыщения» следа, где плотность зерен весьма велика). Статья 33 содержит ценные практические указания по способу пропитки фотоэмульсий и ряду других экспериментальных методик. Энергия и масса частиц, останавливающихся в эмульсии, обычно определяются из измерений длины пробега частиц и плотности зерен в следе. Этим вопросам посвящены статьи 34—37. В статье 38 дано описание прибора для исследования ядерных реакций. Некоторые методы определения заряда тяжелых ядер описаны в статье 39. В последних семи статьях этого раздела (40—46) рассматриваются применения фотографического метода для решения количественных задач дозиметрии и анализа.

В целом сборник дает возможность советскому читателю ознакомиться с новейшими зарубежными работами в области методов изготовления фоточувствительных слоев, предназначенных для изучения ионизирующих излучений, и методов использования этих слоев для научных исследований.

1. МЕХАНИЗМ ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1

Д. Бромли и Р. Герц

КВАНТОВЫЙ ВЫХОД ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ЭМУЛЬСИЙ РЕНТГЕНОВСКИМИ ЛУЧАМИ

D. Bromley, R. H. Herz, Proc. Phys. Soc., B 63, No 362, 90—106 (1950)

§ 1. Введение

Для понимания механизма прямого фотографического действия рентгеновских лучей необходимо знать, как зависит от длины волны коэффициент использования энергии рентгеновских лучей, поглощенных фотографической эмульсией. Коэффициент использования может быть выражен через число бромосеребряных микрокристаллов, получивших способность проявляться в результате поглощения одного кванта. Эта величина часто называется квантовым выходом или выходом зерен на 1 поглощенный квант.

Эггерт и Ноддак [1] определили выход зерен на поглощенный квант рентгеновских лучей в фотографических эмульсиях и нашли, что каждый квант сообщает проявляемость приблизительно одному микрокристаллу бромида серебра. Они использовали неоднородное излучение, эквивалентное монохроматическому излучению с длиной волны $0,45 \text{ \AA}$. Определение этой эквивалентной длины волны основывалось на калориметрическом измерении энергии. Зильберштейн и Тривелли [2] доказали несколько менее прямым путем, что квантовый выход зерен для рентгеновских лучей равен единице. Гюнтер и Титтель [3], пользуясь методом, близким к методу Эггерта и Ноддака, провели подобные же исследования в интервале длин волн от $0,245$ до $1,54 \text{ \AA}$ и подтвердили результаты последних авторов. Кроме того, они нашли, что число атомов серебра, освобождающееся при поглощении кванта рентгеновских лучей, пропорционально его энергии. Пельк [4] дал теоретическое и экспериментальное объяснение увеличению выхода зерен с увеличением энергии кванта.

Целью настоящей работы являлось исследование квантового выхода зерен фотографических эмульсий различных типов в широком интервале длин волн рентгеновских лучей с использованием специальной экспериментальной техники для определения выхода зерен. Эта методика заключалась в измерении истинного поглощения рентгеновских лучей эмульсиями, снятыми с пленочной основы, и в использовании в отдельных случаях монохроматических, а не смешанных рентгеновских лучей. Авторы полагали, что последний способ позволит достичь большей абсолютной точности определения выхода зерен на поглощенный квант.

§ 2. Экспериментальные методы и вычисления

В первой серии опытов пленки получали измеренные дозы фильтрованных неоднородных рентгеновских лучей, качество которых определялось в единицах толщины слоя половинного ослабления меди при помощи ионизационного дозиметра для измерения слоя половинного ослабления. Толщину слоя половинного ослабления пересчитывали в коэффициент ослабления и далее определяли эффективную длину волны, как длину волны монохроматического излучения, имеющего такой же коэффициент ослабления.

В четырех опытах использовалось монохроматическое излучение от вторичных излучателей, в качестве которых применяли платину, медь и карбонат бария. Эти вещества служили источниками характеристических рентгеновских лучей при их облучении смешанными рентгеновскими лучами из трубки с вольфрамовым анодом. K_{β} -лучи профильтровывались через соответствующие дифференциальные (селективные) фильтры. Авторы полагали, что такой метод монохроматизации рентгеновских лучей, поскольку он дает достаточно широкий и однородный пучок, пригодный для измерений плотности и ионизации, предпочтительнее применения монохроматора.

Доза измерялась при помощи конденсаторного рентгенометра Викторийна или, в случае очень мягких рентгеновских лучей, при помощи другого ионизационного дозиметра, построенного на основе ионизационной камеры с целлофановым окошком. Оба рентгенометра калибровались по эталонной ионизационной камере «со свободным воздухом» (т. е. работающей при атмосферном давлении). Число квантов Q_i рентгеновских лучей, падающее на эмульсию при разных длинах волн, вычислялось из определения единицы физической дозы излучения — рентгена. Число квантов Q_a , поглощенных единицей площади фотографической эмульсии, вычислялось далее по формуле $Q_a = Q_i (\mu/\rho_{AgBr}) w$, где μ/ρ_{AgBr} — массовый коэффициент ослабления бромида серебра,

w — вес бромида серебра в $г/см^2$ эмульсии. Подробности вычисления приведены ниже.

Число проявленных зерен подсчитывалось при помощи микроскопа с квадратной окулярной сеткой. Зерна подсчитывались только в одном эмульсионном слое (в случае рентгенопленок с двухсторонним поливом), обращенном к рентгеновской трубке. Из найденного числа зерен вычиталось число зерен вуали, подсчитанных на необлученной и проявленной пленке. Так как подсчет зерен под микроскопом является кропотливой операцией, связанной с довольно большими статистическими ошибками, то число проявленных зерен определялось также путем измерения плотности почернения, исходя из предположения, что эта плотность пропорциональна числу проявленных зерен. Эти измерения были ограничены областью пропорциональной зависимости между плотностью и экспозицией.

Искомое число проявленных зерен, приходящееся на один квант, поглощенный эмульсией, определялось из отношения числа зерен, сосчитанных на единице площади, к числу поглощенных на этой поверхности квантов.

Энергия E_a рентгеновских лучей, поглощенных малой массой dm воздуха, равна произведению потока энергии E_f в $эрг/см^2$ на массу воздуха в граммах и на ту долю потока энергии, падающего на эту массу, которая превращается в кинетическую энергию электронов. Эта доля равна $(\tau + \sigma_a)_{\text{возд.}}$, где τ — коэффициент фотоэлектрического поглощения, а σ_a — истинный коэффициент поглощения, связанный с комптоновскими электронами отдачи. Следовательно,

$$E_a = E_f dm (\tau + \sigma_a)_{\text{возд.}}, \quad (1)$$

откуда

$$E_f = \frac{E_a}{dm (\tau + \sigma_a)_{\text{возд.}}} \quad (1a)$$

По определению, 1 рентген создает в $1 см^3$ воздуха ионы, несущие 1 электростатическую единицу количества электричества каждого знака. Дозе в 1 рентген соответствует образование $1/e$ пар ионов в $1 см^3$ (0,001293 г) воздуха, где e — заряд электрона в единицах CGSE. Энергия, необходимая для образования одной пары ионов (т. е. работа ионизации), приблизительно равна 33 эв. Следовательно, дозе в 1 рентген соответствует поглощение в $1 см^3$ воздуха $33/e$ эв энергии. Так как $1 эв = e/300 эрг$, то дозе в 1 рентген соответствует поглощение $33/300 = 0,11 эрг$ в $1 см^3$ воздуха. Поэтому формула (1a) может быть переписана в виде

$$E_f' = \frac{0,11}{(\tau + \sigma_a)_{\text{возд.}}} эрг/см^2, \quad (1б)$$

где E'_f — поток энергии на рентген. Это выражение зависит от длины волны, так как множитель $(\tau + \sigma_a)_{\text{возд.}}$ является функцией длины волны. Зависимость потока энергии, необходимого для получения дозы в 1 рентген в воздухе, от длины волны была вычислена и представлена графически на рис. 1. В согласии с аналогичными вычислениями Мейнорда [5] кривая имеет максимум около $0,1 \text{ \AA}$, где поток энергии более чем в 6 раз больше его значения при $0,4 \text{ \AA}$.

Энергия, поглощенная при данной длине волны на 1 см^2 тонкого слоя бромосеребряной эмульсии, может быть вычислена для

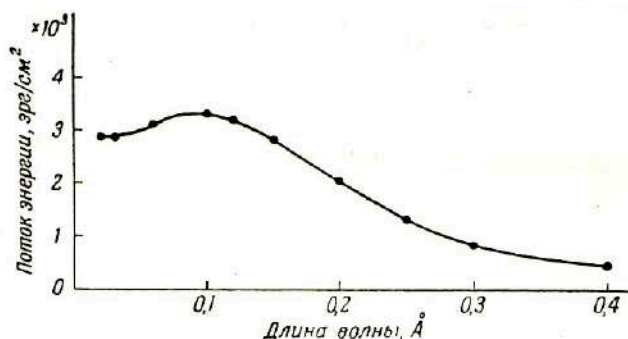


Рис. 1. Зависимость потока энергии в эрг/см² от длины волны (в расчете на дозу в 1 рентген).

каждой дозы путем умножения формулы (1б) на $\frac{\mu}{\rho}$ — массовый коэффициент ослабления бромида серебра, на w (нанос бромида серебра в г/см² эмульсии) и на число рентгенов r . В результате получим

$$E_a = \frac{0,11 \mu w r}{\rho (\tau + \sigma_a)_{\text{возд.}}} \text{ эрг/см}^2. \quad (2)$$

Поглощение желатиной в этих вычислениях не учитывается, так как расчеты показывают, что связанная с этим ошибка не превышает 1%. Поток энергии E на дозу в 1 рентген может быть пересчитан в число квантов Q делением на энергию соответствующего кванта:

$$Q = \frac{E'_f}{h\nu} = \frac{\lambda E'_f}{hc} = \frac{0,11 \lambda}{hc (\tau + \sigma_a)_{\text{возд.}}} = \frac{5,53 \cdot 10^{14} \lambda}{(\tau + \sigma_a)_{\text{возд.}}}.$$

Если λ выразить в ангстремах, то

$$Q = \frac{5,53 \cdot 10^5 \lambda}{(\tau + \sigma_a)_{\text{возд.}}} \quad (3)$$

Число квантов, поглощенных на рентген на 1 см^2 эмульсии, можно получить умножением правой части формулы (3) на суммарный массовый коэффициент ослабления бромида серебра и на вес бромида серебра на 1 см^2 эмульсии (желатина не учитывается). Если принять плотность AgBr равной 6,47, то

$$Q_a = \frac{0,855 \cdot 10^6 \mu w}{(\tau + \sigma_a)_{\text{вод.}}} \quad (4)$$

Суммарный массовый коэффициент ослабления бромида серебра для различных длин волн вычислялся по формуле

$$\mu_{\text{AgBr}}/\rho = \frac{w_1}{w_1 + w_2} \cdot \frac{\mu}{\rho_{\text{Ag}}} + \frac{w_2}{w_1 + w_2} \cdot \frac{\mu}{\rho_{\text{Br}}},$$

где w_1 и w_2 — вес серебра и соответственно брома.

§ 3. Фильтрация и определение длины волны

Смешанное излучение. Чтобы охватить широкий интервал длин волн, сначала использовались неоднородные пучки рентгеновских лучей. Напряжение генерирования, условия фильтрации и эффективные длины волн этих лучей приведены в табл. 1. Эффективные длины волн определялись из измерений слоя половинного ослабления меди и серебра.

Таблица 1

Напряжение генерирования, условия фильтрации и эффективная длина волны

Напряжение, кВ	Фильтрация	Эффективная длина волны, Å
50	0,4 мм Cu	0,30
80	0,8 мм Cu	0,21
120	1,2 мм Cu	0,16
195	4,0 мм Cu	0,10
475	4,53 мм Sn	0,047
1 000	2 мм Al + 4,2 мм Fe + 6,5 мм Pb	0,024
γ-лучи	1,0 см Pb	0,0105

Результаты определения квантового выхода, приведенные в параграфе 5, относятся к длинам волн, указанным в табл. 1.

Так как авторы несколько сомневались в точности определения длины волны неоднородных пучков рентгеновских лучей, величина которой могла сильно повлиять на результаты определений квантового выхода, то длины волн были проверены косвенным

путем при помощи измерений поглощения в эмульсии, снятой с основы. Результаты этих измерений сравнивались далее с данными, вычисленными, исходя из массовых коэффициентов ослабления для длин волн, определенных по методу слоя половинного ослабления.

Поглощение измерялось с помощью ионизационного дозиметра, состоящего из электрометра Линдемана и двух наперстковых ионизационных камер одинакового устройства и объема. Центральные электроды обеих наперстковых камер были соединены со штифтом электрометра. Стенки камер были соединены с источниками равных, но противоположных потенциалов (54 в). При таком устройстве, если объемы камер были одинаковы и если камеры находились в общем пучке рентгеновских лучей с равномерной по сечению интенсивностью, то обе камеры получали одинаковые дозы рентгеновских лучей и нить электрометра находилась в электрическом равновесии. Если снятую с основы фотографическую эмульсию помещали над одной из камер, то нить электрометра отклонялась пропорционально поглощению в эмульсии, которое и могло быть измерено таким способом. Доля поглощенной энергии (в процентах) равна $100 (I_0 - I_1)/I_0$, где I_0 — интенсивность лучей, падающих на эмульсию, I_1 — интенсивность после прохождения через нее. Описанный метод непосредственно дает разность $I_0 - I_1$, но не позволяет определить значений I_0 и I_1 в отдельности. Значение I_0 одновременно измерялось при помощи конденсаторного рентгенометра Викторийна. Таким образом, результаты, полученные этим методом, по существу не зависят от флуктуаций в пучке. Между тем при измерении столь малых поглощений по способу последовательных отсчетов в присутствии и в отсутствие поглотителя ошибки в отсчетах по рентгенометру и различия в интенсивности, обусловленные флуктуациями интенсивности пучка, обычно бывают того же порядка, что и измеряемая величина, обусловленная искомым поглощением. В практической работе при выведенном поглотителе точное равновесие нити достигается с трудом, и остается слабое остаточное смещение. Поэтому величина этого смещения с соответствующим знаком вычиталась из смещения, вызванного измеряемым поглощением.

Измерялось поглощение 1, 2, 3... и т. д. наложенных друг на друга слоев снятой эмульсии, которые помещались на расстоянии около 2,5 см над одной из ионизационных камер. Полученные результаты, представленные в виде графика зависимости поглощения (в процентах) от числа эмульсионных слоев, показали, что поглощение возрастает с большей скоростью, чем толщина поглощающего слоя (т. е. число слоев). Это явление объясняется рассеянием рентгеновских лучей и потерями на флуоресценцию в поглощающих слоях. Влияние рассеяния удалось устранить, помещая поглощающие слои в 20 см над измерительной камерой.

Типичные результаты измерений поглощения снятых эмульсионных слоев показаны на рис. 2. Поглощение одного слоя, взятое из графика, равно 0,37 % для излучения, длина волны которого, вычисленная из толщины слоя половинного ослабления, равна 0,21 Å. Поглощение лучей с такой длиной волны, вычисленное по табличным данным для коэффициента поглощения, в данном частном случае точно совпадает с измеренным. Можно упомянуть, что в этих опытах использовалась хлоробромистая эмульсия и что при вычислении поглощения для волн различной длины учитывались вещества, входящие в состав эмульсии. Измерения поглощения были проведены также и на эмульсии другого типа с использованием излучений, генерированных при 50 кВ и отфильтрованных 0,4 мм Си, при 80 кВ и 0,8 мм Си, при 120 кВ и 1,2 мм Си.

Кроме того, авторы измеряли толщину слоев половинного ослабления для этих лучей в серебре и меди и, пользуясь эффективными длинами волн, вычислили соответствующие значения поглощения. Вычисленные и опытные значения поглощения находились в удовлетворительном согласии — максимальное расхождение между ними не превышало 7 %.

Выше было упомянуто, что толщины слоев половинного ослабления выражались также и в миллиметрах серебра. Это было сделано в связи с тем, что эффективная длина волны одного и того же смешанного излучения была различна в различных веществах. Так как поглощение в бромосеребряной эмульсии определяется главным образом серебром, то авторы полагали, что слой половинного ослабления серебра будет служить лучшей оценкой действительного качества рентгеновских лучей в данном конкретном случае. Однако оказалось, что результаты измерений лишь слабо зависели от того, определялся ли слой половинного поглощения в меди или серебре.

Монохроматические лучи. Ввиду ненадежности определения длины волны неоднородных пучков рентгеновских лучей были проведены опыты с целью получения монохроматических лучей. Существует два метода получения таких лучей: 1) отражение от

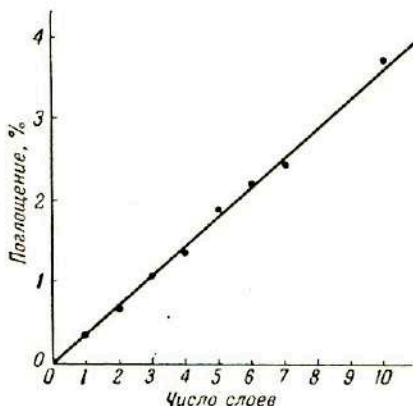


Рис. 2. Зависимость поглощения от числа слоев снятой эмульсии для рентгеновских лучей, генерированных при 80 кВ, 8 мА; фильтр — 0,8 мм Си (эффективная длина волны — 0,21 Å).

кристалла и 2) возбуждение вторичного характеристического излучения в результате поглощения первичного пучка рентгеновских лучей. Метод 1 дает достаточно интенсивный, но узкий пучок рентгеновских лучей; он позволяет выделить любую линию известной длины волны или вычислить по формуле Брэгга любую длину волны. Однако измерения дозы в рентгенах становятся затруднительными вследствие малой ширины пучка. Метод 2 дает широкий пучок малой интенсивности. В этом методе необходимо

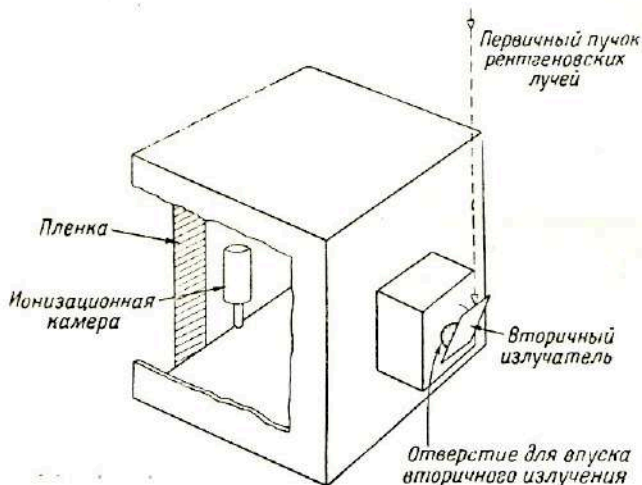


Рис. 3. Прибор для генерирования монохроматических рентгеновских лучей и одновременного измерения при помощи пленки и ионизационной камеры.

тщательное экранирование от первичного пучка. Спектр обычно содержит несколько линий наряду со смешанным и сплошным излучением. Второй метод казался более подходящим для настоящего исследования, главным образом потому, что, как показали предварительные испытания, он дает широкий и сравнительно равномерный по интенсивности пучок лучей, позволяющий одновременно экспонировать пленку и измерять дозу рентгеновских лучей. Экспериментальная установка изображена на рис. 3. Основной частью установки являлся большой ящик, выложенный свинцом. Одна стенка ящика была удалена, а на противоположной стенке укреплен маленький ящик с отверстием для впуска вторичного излучения. Ионизационная камера и пленка находились у открытой стенки ящика, против отверстия. Первичный пучок рентгеновских лучей падал на вторичный излучатель (платина, медь или брусок карбоната бария). Основная роль большого ящика сводилась к защите пленки и ионизационной камеры

от первичных рентгеновских лучей. Пленка и камера располагались параллельно плоскости отверстия на расстоянии 25 см от него, как показано на рис. 3. Характеристические лучи, использованные для этого исследования, и селективные фильтры для устранения рассеяния и K_3 -лучей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика лучей и фильтров

Длина волны, Å	Лучи	Фильтр
0,188 0,39 1,2	K_α платины K_α бария L платины	Селективный фильтр, CaWO_4 KJ Без фильтра, возбуждение первичными рентгеновскими лучами, генерированными при 70 кВ, т. е. ниже потенциала возбуждения K -линий платины.
1,4	K_α меди	Селективный фильтр, Ni

Указанные длины волн были выбраны потому, что они охватывают довольно широкий интервал и соответствующие вторичные излучатели были легко доступны.

Селективные фильтры изготовлялись следующим способом.

Для K_α -линии платины применялся задний усиливающий экран «Кодак ультраспид». Для изготовления фильтра для K_α -линии бария мелкие кристаллы нитрида калия смешивались с нитроцеллюлозным лаком, этой смесью поливался тонкий картон, который помещался между двумя листами подложки рентгенопленки. Количество нитрида на 1 см^2 , необходимое для поглощения K_β -линии, вычисляли исходя из пропускания 1/200 падающей интенсивности. Фильтром для K_α -лучей меди служила никелевая фольга толщиной 0,051 мм.

Для проверки монохроматичности излучения служил спектрограф с неподвижным кристаллом. Последнее обстоятельство было обусловлено тем, что на кристалл падали лучи под различными углами, ибо вторичный излучатель давал рассеянные лучи. Спектрограммы K -лучей бария и платины и L -лучей платины показали, что K_β -линия бария избирательно поглощалась нитридом калия. В случае платины K_α - и K_β -линии не могли быть разрешены, но можно принять, что K_β -линия была частично устранена в результате избирательного поглощения пластинкой вольфрамата кальция CaWO_4 . На спектрограммах отсутствует фон от рассеянного и сплошного излучения.

Дальнейшая проверка качества K -лучей бария и платины была произведена при помощи фотографического метода измерения поглощения, описанного в литературе [6]. Полученные кривые поглощения были почти прямолинейны. Невозможно было выяснить, обусловлено ли слабое отклонение от линейной зависимости влиянием фона или неточностью фотографического метода. Коэффициенты поглощения двух групп лучей вычислялись из средних наклонов кривых поглощения; соответствующие им эффективные длины волн приведены в табл. 3.

Таблица 3
Эффективная длина волны

Лучи	Длина волны, Å	Длина волны, определенная из кривых поглощения фотографическим методом
K_{α} платины . . .	0,178	0,183
K_{α} бария	0,39	0,37

Невозможно было различить линии K_{α_1} и K_{α_2} , но этим различием безусловно можно пренебречь. Поэтому использованная длина волны представляла среднее взвешенное из K_{α_1} - и K_{α_2} -линий с отношением весов 2 : 1, соответственно их относительным интенсивностям.

Качество L -лучей платины проверялось измерениями поглощения с использованием снятых слоев рентгеновских эмульсий и алюминиевых листов толщиной 0,1 мм. Поглощение измерялось при помощи ионизационной камеры для пограничных лучей с целлофановым окошком. Поглощение одного слоя снятой эмульсии, определенное по кривой поглощения, было равно 16%, а вычисленное из известной длины волны L -лучей платины — 17,8%. Расхождение между этими значениями, повидимому, объясняется ненадежностью в определении массового коэффициента ослабления бромида серебра в этом интервале длин волн. В этом вычислении массовый коэффициент поглощения был принят равным 88,5.

В случае L -лучей платины эффективная длина волны вычислялась как среднее из наиболее интенсивных L_{α} - и L_{β} -линий и найдена равной 1,2 Å.

Авторам не удалось снять спектрограмму K_{α} -лучей меди в связи с временными неисправностями спектрографа. Проверка вторичного излучения меди была произведена путем измерения поглощения ионизационным дозиметром, которое показало, что это излучение содержало небольшие примеси лучей других длин

волн. Поэтому возможно, что результаты по квантовому выходу для K_{α} -лучей меди менее надежны, чем для других лучей.

Весьма важно было убедиться в равномерности рассеянного характеристического излучения по сечению пучка, поскольку измерение с помощью ионизационной камеры и облучение пленки производились одновременно и рядом. Равномерность излучения проверялась посредством облучения листа пленки, который помещался в открытой стенке ящика и охватывал как местонахождение полосок испытуемых пленок, так и плоскость, проходящую через центр ионизационной камеры. В табл. 4 приведены результаты измерений плотности почернения на ряде участков листа пленки площадью 15×20 см. Значения плотности, заключенные в левую рамку, охватывают участок, на котором обычно находится испытуемая полоска пленки. Значения, заключенные в правую рамку, соответствуют плоскости, проходящей через центр ионизационной камеры.

Таблица 4

Монохроматическое излучение. Изменение плотности почернения по поверхности пленки

A	0,47	0,54	0,58	0,61	0,62	0,61	0,61	0,60	0,58	0,55
B	0,57	0,61	0,64	0,66	0,65	0,65	0,64	0,63	0,61	0,60
C	0,58	0,63	0,66	0,68	0,70	0,69	0,68	0,67	0,65	0,65
D	0,59	0,66	0,69	0,73	0,74	0,74	0,72	0,71	0,68	0,67
E	0,61	0,66	0,72	0,75	0,78	0,79	0,77	0,75	0,73	0,71
F	0,58	0,64	0,70	0,73	0,76	0,77	0,76	0,75	0,72	0,71
G	0,59	0,63	0,68	0,73	0,76	0,77	0,75	0,75	0,71	0,68
H	0,57	0,63	0,68	0,72	0,75	0,76	0,75	0,73	0,69	0,65

Из табл. 4 следует, что средние значения плотности почернения в левой и правой рамках (0,68 и соответственно 0,72) довольно близки. Так как центр ионизационной камеры помещался в одной плоскости с пленкой, то авторы приняли, что отсчеты дозиметра показывают дозу, сообщенную пленке.

Следует указать, что для измерения весьма мягких L -лучей платины и K_{α} -лучей меди применялась упомянутая выше ионизационная камера для пограничных лучей. Она была специально откалибрована для L -лучей платины, которые возбуждались на такой же аппаратуре, как описанная выше. Калибровка производилась путем сравнения с эталонной ионизационной камерой «со свободным воздухом».

§ 4. Счет зерен и измерение плотности

Для определения квантового выхода использовались эмульсии следующих типов: безэкранная рентгеновская пленка (тип А); нормальная рентгеновская пленка (тип В); мелкозернистая без-

экранная рентгеновская пленка (тип С); хлоробромистая съёмная эмульсия (тип D). Все пленки проявлялись при постоянном перемешивании в рентгеновском проявителе D-19b при 20° в течение

4 мин. Обработка производилась в проявительной машине, обеспечивающей высокую воспроизводимость проявления.

В первой серии опытов пленке сообщали весьма малые дозы рентгеновских лучей, чтобы можно было считать проявленные зерна под микроскопом, как это описано в параграфе 2. Затем строили график, изображающий зависимость числа зерен на единице площади от плотности почернения. Плотность измеряли на фотозлектрическом денситометре с высокой степенью воспроизводимости. На рис. 4 изображены типичные кривые, иллюстрирующие зависимость между числом зерен на единице площади и плотностью почернения. Кривые отсекают на оси ординат отрезок, соответствующий плотности почернения подложки. Хотя авторы предполагали,

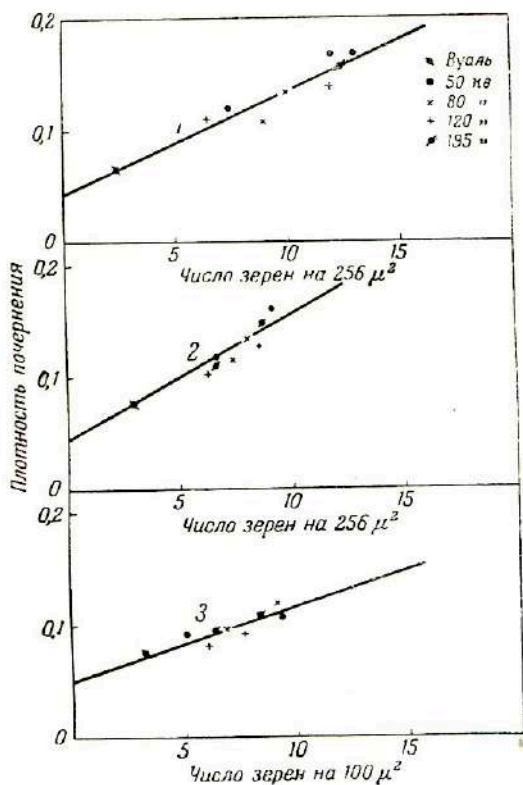


Рис. 4. Зависимость между плотностью почернения и числом проявленных зерен, сосчитанных в пленках типов А, В и С при облучении рентгеновскими лучами с напряжением генерирования 50, 80, 120 и 195 кВ.

1 — пленка типа А, $D/n = 8,8 \cdot 10^{-3}$; 2 — пленка типа В, $D/n = 11,0 \cdot 10^{-3}$; 3 — пленка типа С, $D/n = 6,6 \cdot 10^{-3}$.

что качество излучения не окажет влияния на характер зависимости между числом зерен и плотностью почернения, были проведены специальные испытания с лучами различной длины волны. Полученные результаты нанесены на графики, изображенные на рис. 4, где различным длинам волн соответствуют различные обозначения опытных точек. Случайный характер разброса точек показывает, что качество рентгеновских лучей не влияет на

результаты измерений. Линии регрессии, выражающие зависимость между числом зерен на единице площади и плотностью, были получены способом наименьших квадратов. Средние квадратичные отклонения отдельных точек от линий регрессии составляют величину порядка 1 зерна.

§ 5. Вычисление квантового выхода

Квантовый выход вычислялся из результатов описанных выше измерений, представленных графически на рис. 4. Из измеренного значения дозы в рентгенах, полученной пленкой для каждой экспозиции, по формуле (4) параграфа 2 вычислялось число квантов, поглощенное на единице площади каждой эмульсии. Квантовый выход определялся из отношения

$$\frac{\text{Число проявленных зерен на единице площади}}{\text{Число квантов, поглощенных на единице площади}}.$$

В первых опытах пленкам сообщали малые дозы рентгеновских лучей (меньше 0,01 рентгена) различной длины волны, чтобы можно было под микроскопом подсчитать число проявленных зерен. Так как эти дозы были близки к пределу чувствительности дозиметра, то использование более высоких доз должно было повысить точность измерений. Для определения числа проявленных зерен при больших дозах кривые число зерен — плотность (рис. 4) экстраполировались в область повышенных значений плотности почернения и число проявленных зерен определялось графически. (Плотность для данной дозы измерялась на денситометре.) Законность экстраполяции кривой число зерен — плотность следует из установленной Наттингом [7] зависимости:

$$D = 0,4343 \bar{a} n,$$

где D — плотность почернения, $\bar{a}$ — средняя площадь проекции зерна и n — число проявленных зерен.

Если принять, что для плотностей ниже $D = 1 \text{ а}$ не изменяется с увеличением экспозиции, то формула Наттинга указывает на существование пропорциональности между D и n . Угловые коэффициенты прямых, изображенных на рис. 4, указаны под прямыми. Квантовый выход определялся из выражения

$$\frac{n}{Q} = \frac{D}{r} \cdot \frac{n/D}{Q/r},$$

где n — число проявленных зерен на единице площади (за вычетом зерен вуали), Q — число квантов, поглощенных на единице площади данной эмульсии, r — число рентгенов и D — плотность сверх плотности вуали.

Отношения D/r и n/D определялись экспериментально, как описано выше, а отношение Q/r вычислялось по формуле (4)

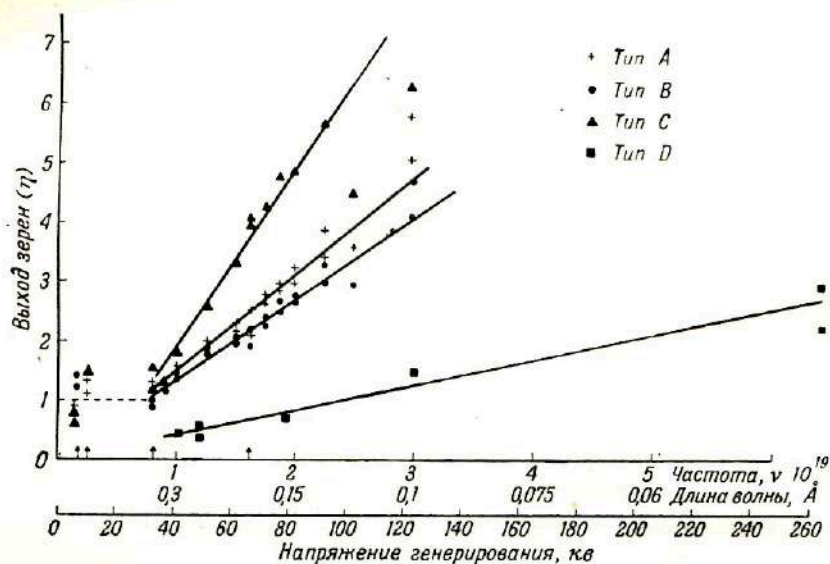


Рис. 5. Зависимость выхода зерен от частоты рентгеновских лучей для пленок типов А, В, С и D. (Облучение монохроматическими рентгеновскими лучами указано стрелками по оси абсцисс.)

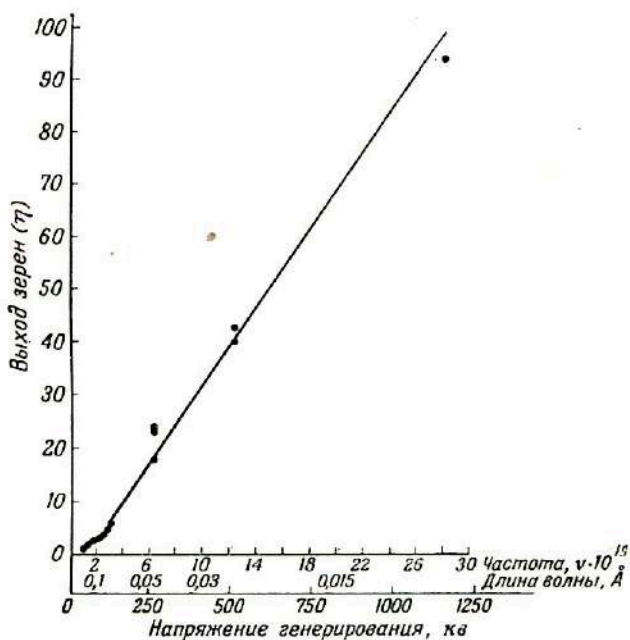


Рис. 6.

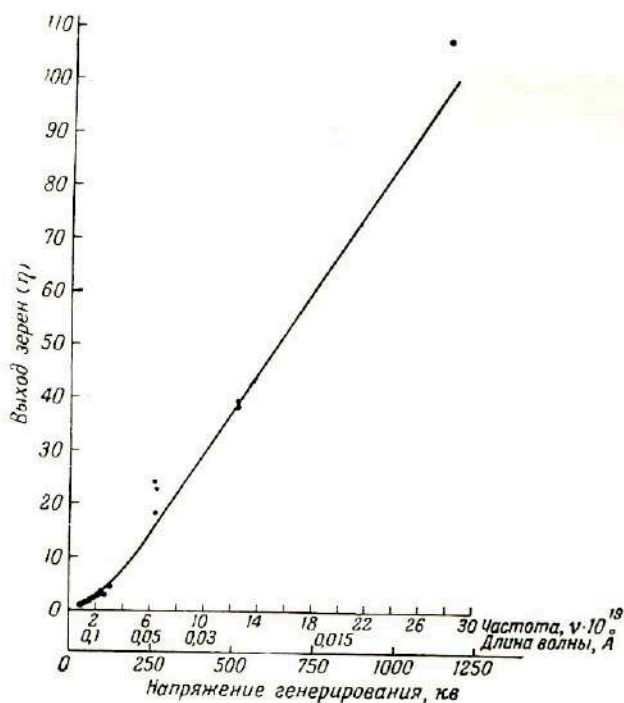


Рис. 7.

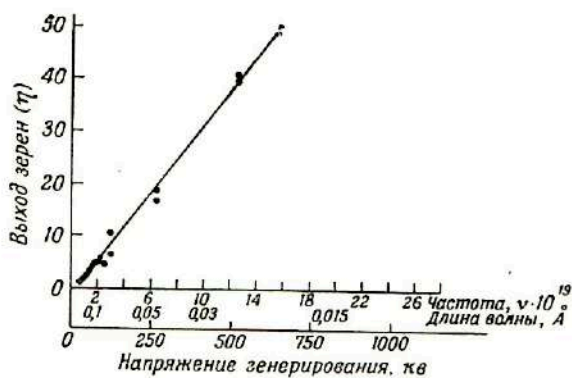


Рис. 8.

Рис. 6—8. Зависимость выхода зерен от частоты рентгеновских лучей, генерированных при напряжении от 40 до 1250 кВ. Пленки типов А (рис. 6), В (рис. 7), и С (рис. 8).

параграфа 2. Значения квантового выхода, полученные для различных частот излучения и различных типов пленок, приведены на рис. 5—8, изображающих зависимость выхода зерен на 1 поглощенный квант η от частоты ν лучей. На рис. 5 приведены данные для пленок типов А, В и С для области длин волн рентгеновских лучей 1,54—0,1 Å и для пленки типа D для области 0,3—0,047 Å. Данные для пленки типа D получены методом непосредственного счета зерен, в то время как остальные результаты получены по экстраполированным кривым число зерен — плотность почернения (см. рис. 4). Результаты для весьма жестких рентгеновских лучей, генерированных при напряжении 475 и 1 000 кВ, а также для γ -лучей радия приведены на рис. 6—8 для пленок типов А, В и, соответственно, С. Следует отметить, что средняя длина волны, соответствующая γ -лучам радиевого источника, отфильтрованным через 1 см свинца, равна 0,0105 Å, что эквивалентно 1 230 кВ.

Результаты, приведенные на рис. 5—8, кратко рассматриваются в параграфе 6 и более подробно — в параграфе 7.

§ 6. Квантовый выход в набухшей пленке. Образование субцентров скрытого изображения

Квантовый выход в набухшей пленке. Полученные результаты показывают, что один поглощенный квант сообщает способность проявляться нескольким зернам. Этот факт можно объяснить тем, что энергия поглощенного кванта достаточно велика для освобождения фотоэлектронов из атомов эмульсионного микрокристалла; фотоэлектроны проходят через эмульсию и сообщают проявляемость соседним микрокристаллам. Правильность такого объяснения доказывается опытами по облучению пленки типа А в набухом состоянии, т. е. в таком состоянии, когда микрокристаллы разделены большими промежутками, чем в сухой пленке. В набухшей эмульсии фотоэлектроны, испущенные поглотившим квант микрокристаллом, будут обладать меньшей вероятностью достигнуть соседних микрокристаллов, во-первых, вследствие большей тормозной способности набухшей в воде желатины и, во-вторых, вследствие увеличения промежутков между микрокристаллами. Квантовый выход в пленке, облученной в набухом состоянии рентгеновскими лучами с $\lambda = 0,1$ Å, был почти вдвое меньше квантового выхода в той же эмульсии, но облученной в сухом состоянии. Этот результат, повидимому, указывает на то, что падение выхода зерен обусловлено уменьшением пробега фотоэлектронов в набухшей эмульсии и увеличением промежутков между микрокристаллами [8].

Можно принять, что в области квантового выхода, равного единице, длина пробега фотоэлектронов, выбитых из микрокристалла, поглотившего квант, недостаточна для достижения соседних микрокристаллов или, по крайней мере, что эти фотоэлектроны уже не способны сообщить проявляемость соседним микрокристаллам. Правильность этого предположения доказывается результатами опытов по облучению пленки типа А в набухшем состоянии лучами с $\lambda = 0,37 \text{ \AA}$. Квантовый выход для сухой пленки в тех же условиях равен 1. Оказалось, что и в набухшей пленке квантовый выход равен 1. Отсюда можно заключить, что выход зерен, равный единице, достигается в результате поглощения одного кванта без участия фотоэлектронов от соседних зерен.

Образование субцентров скрытого изображения. Бертон и Берг [9] показали, что если на кривой плотность почернения — экспозиция имеется начальный участок с возрастающим наклоном, то в эмульсии, характеризующейся такой кривой, возможно образование субцентров скрытого изображения. Единственной пленкой, обладавшей таким начальным участком кривой плотность почернения — экспозиция, была пленка типа D. Именно для этой пленки квантовый выход в области волн длиннее $0,13 \text{ \AA}$ оказался меньше 1. Опыты по дополнительному облучению этой пленки светом малой интенсивности подтвердили образование субцентров в этой пленке и их отсутствие во всех других исследованных нами эмульсиях.

§ 7. Интерпретация результатов и выводы

Рассмотрение рис. 5—8 позволяет сделать следующие выводы.

Выход зерен в интервале $1,2—0,37 \text{ \AA}$ (см. рис. 5). В области весьма мягких лучей ($1,54—0,37 \text{ \AA}$) имеется горизонтальный участок, соответствующий квантовому выходу, равному 1. Очевидно, что для всех трех эмульсий типов А, В и С энергия 1 поглощенного кванта достаточна для сообщения проявляемости одному зерну в этом сравнительно широком интервале длин волн. Это означает, что число фотоэлектронов, освобождаемое одним квантом наиболее коротковолновых лучей из этой области, т. е. $0,37 \text{ \AA}$, превышает число их, необходимое для проявляемости одного микрокристалла. Однако длина пробега этих фотоэлектронов недостаточна для того, чтобы они могли достигнуть соседних микрокристаллов, и поглощение одного кванта не приводит к проявлению этих микрокристаллов. Это предположение подтверждается также опытами, описанными в предыдущем параграфе, показавшими, что

квантовый выход в набухшей эмульсии при $\lambda = 0,37 \text{ \AA}$ не отличается от его значения в сухой эмульсии (т. е. равен 1).

Выход зерен в интервале $0,37-0,0105 \text{ \AA}$ (см. рис. 6—8). Наиболее существенная особенность этих графиков заключается в том, что выход зерен пропорционален энергии кванта во всем интервале длин волн до $0,01 \text{ \AA}$ для пленок типа А и В и до $0,047 \text{ \AA}$ для пленки типа С. Кривые не проходят через начало координат;

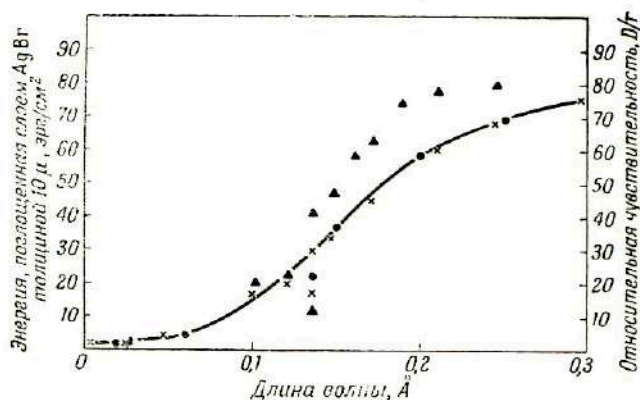


Рис. 9. Зависимость энергии, поглощенной слоем бромида серебра толщиной 10μ , от длины волны рентгеновских лучей и зависимость чувствительности пленок типов А и С от длины волны.

- — поглощенная энергия (вычислено);
- × — относительная чувствительность D/r (пленка типа А);
- Δ — относительная чувствительность D/r (пленка типа С).

кривые для пленок типа А и В имеют точку перегиба при $\lambda \approx 0,1 \text{ \AA}$. Эти результаты согласуются с результатами, полученными Пельком [4]. Однако найденные им значения квантового выхода в 8 раз превышают данные авторов, что обусловлено ошибочным определением количества серебра (частное сообщение Пелька).

Для сопоставления полученных результатов с теоретическими расчетами следует обратиться к рис. 9 и 10. На рис. 9 изображена зависимость между длиной волны и количеством энергии, поглощенной на единице площади слоя бромида серебра толщиной 10μ (вычислено по формуле (2) параграфа 2). На рис. 10 представлена зависимость между длиной волны и числом квантов, поглощенным на единице площади слоя бромида серебра толщиной 10μ (вычислено по формуле (4) параграфа 2). Экспериментально определенные значения относительной чувствительно-

сти пленок типа А и С выражены в единицах D/r , где D — плотность почернения, а r — доза в рентгенах. Значения чувствительности были нормированы таким образом, чтобы они совпадали с кривой энергии при $\lambda = 0,3 \text{ \AA}$ (рис. 9) и с кривой поглощенных квантов при $\lambda = 0,3 \text{ \AA}$ (рис. 10). Данные для чувствительности

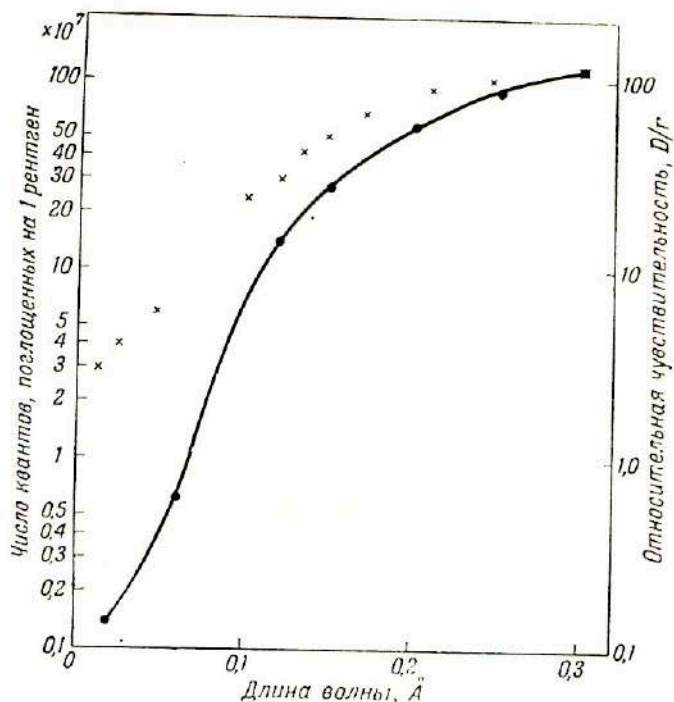


Рис. 10. Зависимость числа квантов, поглощенных на 1 рентген, и относительной чувствительности пленки типа А от длины волны рентгеновских лучей.

● — число квантов, поглощенных на 1 см^2 слоя бромида серебра толщиной 10μ .
 x — относительная чувствительность D/r (пленка типа А).

были получены только в области прямолинейного участка характеристической кривой пленок типа А и С.

Из рис. 9 следует, что величины чувствительности для пленки типа А во всем интервале длин волн совпадают с кривой поглощенной энергии. Так как энергия кванта возрастает с уменьшением длины волны, то число проявленных зерен на поглощенный квант, естественно, должно быть пропорционально энергии кванта, поглощенной при каждой величине λ . Однако из кривой для пленки типа С (см. рис. 9) следует, что значения относительной

чувствительности этой пленки не столь хорошо совпадают с кривой поглощенной энергии в исследованном интервале длин волн.

Из рис. 10 видно, что расхождение между значениями чувствительности и кривой, изображающей число поглощенных квантов, увеличивается с уменьшением длины волны. Отсюда следует, что один поглощенный квант малой длины волны сообщает проявляемость большему числу зерен, чем один квант большой длины волны.

Происхождение изгиба кривых на рис. 6 и 7 при $\lambda \approx 0,1 \text{ \AA}$ непонятно. Поскольку этот изгиб отсутствует на кривой для пленки типа С, можно полагать, что он является не кажущимся, а реальным эффектом. Трудно предполагать, что этот эффект представляет субъективную ошибку наблюдателя, так как тот же самый метод и те же данные использовались при исследовании и оценке квантового выхода в пленке типа С (см. рис. 8).

Можно предложить следующее объяснение механизма увеличения числа проявленных зерен с увеличением энергии кванта:

а) С увеличением энергии кванта возрастает энергия освобожденных им фотоэлектронов. Энергия фотоэлектронов равна $h\nu - \omega_k$, где ω_k — работа, необходимая для выбивания электрона K -уровня.

б) Пробег фотоэлектронов, выбитых одним квантом, возрастает с энергией кванта, что ведет к увеличению числа соседних микрокристаллов, затронутых этими фотоэлектронами.

Авторами были вычислены средние энергии фотоэлектронов и электронов отдачи, выбитых в бромосеребряной эмульсии рентгеновскими лучами различной длины волны. Приближенные данные по зависимости пробега — энергия для электронов в желатине и бромосеребряных эмульсиях имеются в литературе. Экспериментальные данные по этой зависимости содержатся в недавней работе по определению пробега электронов в ядерных эмульсиях [10, 11]. Средняя энергия фотоэлектрона, выбитого квантом с $\lambda = 0,37 \text{ \AA}$, равна около 9 кэв. Такой длине волны соответствует квантовый выход, равный единице, и фотоэлектроны обладают недостаточной энергией, чтобы активировать соседние микрокристаллы. Электрон с энергией 9 кэв имеет пробег около 0,9 μ в бромосеребряной эмульсии типа А. Так как промежутки между микрокристаллами этой эмульсии равны 1—2 μ , то электроны потеряют всю свою энергию, не достигнув соседних микрокристаллов. Квантовому выходу 2 соответствует длина волны 0,23 $\text{\AA}$ в случае эмульсии типа А; средняя энергия фотоэлектрона в этом случае равна 32 кэв, а соответствующий пробег в бромосеребряной эмульсии — 9 μ . Этот сравнительно большой пробег, повидимому, достаточен, чтобы электроны могли сообщить проявляемость соседним микрокристаллам.

Резюмируя, можно сказать, что во всем интервале энергий квантов на образование скрытого изображения затрачивается приблизительно одна и та же доля энергии кванта. В связи с этим интересно отметить, что 1 квант лучей, генерируемых при 1 000 кэ, сообщает проявляемость 80 микрокристаллам, а 1 квант γ -лучей — 100 микрокристаллам.

Прирост выхода зерен с увеличением энергии кванта. Кривые выхода зерен для трех различных эмульсий (см. рис. 5) имеют разные наклоны. Прирост выхода зерен с увеличением энергии кванта у пленки типа С значительно больше, чем у пленок типа А и В, которые имеют примерно равные наклоны кривых. Авторы полагают, что это явление обусловлено более плотной упаковкой микрокристаллов в эмульсии типа С. Вследствие более плотной упаковки фотоэлектроны, освобожденные из микрокристалла, поглотившего один квант, смогут на своем пути активировать большее число микрокристаллов, чем электроны равного пробега в более разбавленной эмульсии.

Начиная с определенной энергии кванта (при $\lambda \approx 0,05 \text{ \AA}$), наклоны кривых (см. рис. 6—8) становятся практически равными для всех трех эмульсий. Это, повидимому, означает, что по достижении определенной длины пробега фотоэлектронов различия в промежутках между микрокристаллами становятся несущественными и квантовые выходы для всех трех эмульсий уравниваются.

Выход зерен в пленке типа D. Из рис. 5 видно, что в случае пленки типа D квантовый выход, равный единице, достигается лишь при сравнительно малых длинах волн и что он значительно ниже единицы в области длин волн, больших $0,12 \text{ \AA}$. Это означает, что микрокристаллы пленки типа D обладают сравнительно малой чувствительностью. Повидимому, поглощения одного кванта недостаточно для сообщения проявляемости одному микрокристаллу, и во многих микрокристаллах, хотя и поглотивших по одному кванту, количество фотоэлектронов недостаточно для сообщения этим кристаллам проявляемости. В этих микрокристаллах образуются субцентры скрытого изображения, что было доказано методом дополнительного облучения светом малой интенсивности (см. § 6).

При сравнении результатов по определению квантового выхода для пленки типа D в той области длин волн, где выход зерен меньше единицы ($\lambda > 0,12 \text{ \AA}$), с результатами для пленок типов А, В и С (см. рис. 5) может показаться непонятным отсутствие горизонтального участка на кривой выход зерен — частота излучения для пленки типа D. Эту особенность пленки типа D можно

объяснить следующим образом. Если длина волны превышает $0,12 \text{ \AA}$, пробег фотоэлектронов достаточен для достижения микрокристаллов, окружающих микрокристалл, поглотивший квант рентгеновских лучей. Это следует из результатов для других пленок. Однако энергия этих фотоэлектронов недостаточна для сообщения проявляемости микрокристаллам пленки типа D (образуется субизображение). Если длина волны меньше $0,125 \text{ \AA}$, то уже не только пробег, но и энергия фотоэлектронов достаточна для создания требуемой ионизации в соседних микрокристаллах, которые таким образом приобретают способность проявляться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eggert J., Noddack W., Z. Physik., **23**, 222 (1927).
2. Silberstein L., Trivelli P. H., Phil. Mag., **9**, 787 (1930).
3. Günter P., Tittel H., Z. Electrochem., **39**, 646 (1933).
4. Pelc S. R., Proc. Phys. Soc., **57**, 523 (1945).
5. Mayneord W. V., Brit. J. Radiolog., **13**, 235 (1940).
6. Seemann H. E., MacGillivray L. L., Rev. Sci. Instr., **17**, 12 (1946).
7. Nutting P. G., Phil. Mag., **26**, 423 (1913).
8. Herz R. H., Photogr. J., **89B**, 89 (1949).
9. Burton P. C., Berg W. F., Photogr. J., **86B**, 1 (1946).
10. Herz R. H., Nature, **161**, 928 (1948).
11. Herz R. H., Phys. Rev., **75**, 478 (1949).

2

Дж. Грининг

ФОТОГРАФИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

J. R. Greening, Proc. Phys. Soc., B **64**, No 11, 977—992 (1951).

§ 1. Введение

Фотографические методы измерения количества рентгеновских лучей часто были бы весьма удобны, если бы они обладали точностью, близкой к точности ионизационных методов. Автор исследовал некоторые факторы, влияющие на фотографическое действие рентгеновских лучей, в надежде на то, что понимание основ этого действия позволит уменьшить существующие недостатки фотографического метода.

§ 2. Зависимость плотности почернения от интенсивности

Изменение плотности почернения с интенсивностью рентгеновских лучей исследовалось рядом авторов [1—10]. Никто из этих авторов не обнаружил колебаний плотности, превышающих по-

грешности опыта, причем в некоторых работах [6, 7, 9] был исследован интервал интенсивностей $10\,000:1$. Аналогичные результаты были получены для γ -лучей радия [11—13] и электронов [14—17].

В современных теориях образования скрытого изображения [18] принимается, что для образования активного центра проявления необходимо, чтобы эмульсионный микрокристалл поглотил определенное минимальное количество энергии в течение определенного максимального времени. Если эта энергия сообщается микрокристаллу в результате не одного, а нескольких дискретных актов поглощения, то вероятность поглощения этой энергии в пределах максимально допустимого времени уменьшается с падением интенсивности, что приводит к так называемому отклонению от закона взаимозаместимости при низких интенсивностях. В случае рентгеновских лучей обычно достаточно поглощения одного кванта, чтобы сообщить микрокристаллу проявляемость, и поэтому нельзя ожидать отклонения от закона взаимозаместимости. Однако почернение пленки, облученной весьма коротковолновыми рентгеновскими лучами, почти полностью обусловлено действием электронов, освобожденных из окружающего вещества (см. § 4). Удельная ионизация под действием этих электронов может быть столь мала, что прохождения одного электрона сквозь эмульсионный микрокристалл не будет достаточно для проявления последнего. Следовательно, при облучении эмульсий с малочувствительными микрокристаллами лучами высокой энергии можно ожидать некоторых отклонений от закона взаимозаместимости.

Если длительность облучения измеряется неделями, то плотность почернения может значительно уменьшиться в результате регрессии уже образовавшегося скрытого изображения. Конечный результат в этом случае будет таков же, как при падении плотности вследствие отклонения от закона взаимозаместимости при низких интенсивностях.

§ 3. Зависимость плотности почернения от экспозиции

Если поглощения одного рентгеновского кванта или прохождения одного электрона достаточно для сообщения микрокристаллу проявляемости, то пороговая экспозиция, ниже которой не наблюдается фотографического эффекта, должна отсутствовать. В этом случае по теоретическим соображениям [19—21] плотность почернения пропорциональна экспозиции при низких плотностях.

Пропорциональность между плотностью и рентгеновской экспозицией при малых плотностях экспериментально наблюдалась рядом авторов [2, 3, 7, 22—25]. Аналогичные результаты были получены для γ -лучей радия [11—13, 26] и электронов различной энергии [14, 15, 17, 26, 27].

Несмотря на эти данные, нельзя считать, что пропорциональность между начальной плотностью и экспозицией должна существовать для всех эмульсий при всех длинах волн. Пока для проявляемости микрокристалла достаточно поглощения одного кванта энергии, такое предположение кажется оправданным, однако если для проявляемости требуется несколько актов поглощения энергии, то следует ожидать, что кривая плотность почернения — экспозиция будет иметь область недодержек, наблюдающуюся при освещении видимым светом. Область передержек была обнаружена при облучении мелкодисперсной эмульсии длинно-

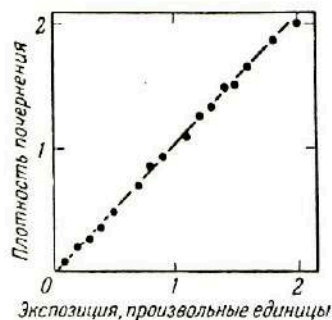


Рис. 1. Зависимость плотности почернения от экспозиции для штриховой пленки Ильфорд, облученной рентгеновскими лучами с $\lambda_{эф.} = 0,11 \text{ \AA}$.

волновыми рентгеновскими лучами [28]. Небольшая область передержек найдена при облучении лучами весьма высокой энергии — γ -лучами радия и β -лучами P^{32} [26]. Бромли и Герц* сообщают, что одна из исследованных ими пленок с довольно малочувствительными микрокристаллами обнаруживала область недодержек на кривой плотность — экспозиция при облучении жесткими рентгеновскими лучами. Именно для такой пленки можно было ожидать существенного отклонения от закона взаимозаместимости (см. § 2). Автор облучал мелкодисперсную эмульсию (штриховая пленка Ильфорд) неоднородными рентгеновскими лучами с эффективной длиной волны $\lambda_{эф.} = 0,11 \text{ \AA}$. Результаты, приведенные на рис. 1, указывают на существование строгой пропорциональности между плотностью почернения и экспозицией вплоть до значения плотности не меньше 1,8. Аналогичные результаты были получены для ряда более длинных волн вплоть до $\lambda_{эф.} = 0,35 \text{ \AA}$ [29]. Такая же линейная зависимость была обнаружена для γ -лучей радия [30].

§ 4. Зависимость плотности почернения от толщины материала, окружающего пленку

В процессе измерения γ -лучей ионизационными камерами была обнаружена зависимость ионизации от толщины стенок камеры [31]. Автор полагал существенным выяснить, наблюдается ли аналогичный эффект при соответствующих фотографических

* См. статью 1, стр. 7.

измерениях. Для этого пленки облучались рентгеновскими лучами с эффективной длиной волны 0,070, 0,040 и 0,020 Å. Пленки находились в кассетах из тонкой черной бумаги (толщиной 7,27 мг/см²), сзади которых была помещена пластинка перспекса толщиной 2,2 мм. Сторона пленки, обращенная к рентгеновской трубке, покрывалась чистой пленочной основой и перспексом различной толщины. Зависимость плотности почернения от толщины покровного материала с малым атомным номером показана на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что плотность быстро возрастает с толщиной покровного материала и что «нехватка плотности» увеличивается с уменьшением длины волны рентгеновских лучей. Для лучей с $\lambda_{эф.} = 0,020$ Å почти половина максимальной плотности почернения создается электронами, поступающими из материала, окружающего кассету из черной бумаги. Очевидно, что в нормальных условиях пленки должны быть окружены материалом достаточной толщины, чтобы получить максимальный электронный поток в эмульсии. Такой метод можно рекомендовать также для избежания ошибок, обусловленных электронами из корпуса рентгеновской трубки или из источника γ -лучей, проходящими через эмульсию. В опытах автора количество электронов, приходящих из воздуха, находящегося между рентгеновской трубкой и пленкой, было сведено к минимуму благодаря использованию узкого пучка рентгеновских лучей.

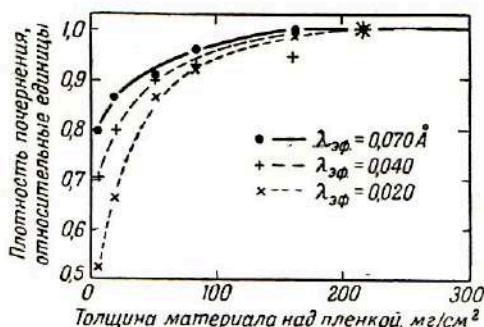


Рис. 2. Зависимость плотности почернения от толщины материала над пленкой.

§ 5. Зависимость плотности почернения от угла падения рентгеновских лучей

Во многих случаях применения фотографических пленок для измерения рентгеновских лучей последние падают на пленку под различными углами. Поэтому интересно выяснить влияние изменения угла падения на плотность почернения.

Пусть пучок рентгеновских лучей интенсивностью I падает под углом θ на эмульсию толщиной d и пусть μ будет линейным коэффициентом ослабления эмульсии для данных рентгеновских лучей. Тогда энергия, поглощенная в 1 сек. 1 см² эмульсии, равна $I \cos \theta (1 - e^{-\mu d / \cos \theta})$. Если частное $\mu d / \cos \theta$ мало, это выраже-

ние переходит в $I\mu d$, т. е. не зависит от θ . Однако если частное $\mu d/\cos \theta$ не мало, то отношение плотности почернения при θ° к плотности почернения при угле падения θ° равно

$$\frac{I(1 - e^{-\mu d}) - I \cos \theta (1 - e^{-\mu d/\cos \theta})}{I(1 - e^{-\mu d})} = \quad (1)$$

$$= 1 - \cos \theta (1 - e^{-\mu d/\cos \theta}) / (1 - e^{-\mu d}) \quad (2)$$

Таким образом, с изменением угла падения наблюдается некоторое изменение плотности почернения, хотя на практике этот эффект мал. Для штриховой пленки Илфорд теоретическое уменьшение плотности почернения при 80° равно 0,2% для $\lambda_{\text{эф.}} = 110 \text{ \AA}$ и 4—5% для $\lambda_{\text{эф.}} = 0,327 \text{ \AA}$.

При малых длинах волн следует ожидать других эффектов, связанных с углом падения лучей. В этом случае, как показано выше, значительная часть полного почернения создается электронами из окружающего пленку материала малого атомного номера. При малых длинах волн большая часть этих электронов является электронами отдачи, и их основное направление движения совпадает с направлением пучка рентгеновских лучей. Поэтому мы примем, что на эмульсию падает параллельный пучок электронов. (Это предположение не совсем правильно, поскольку оно не учитывает рассеяния электронов и различий в значениях начальных углов выбрасывания электронов, что, впрочем, не отразится на качественной пригодности последующих соображений.) Если эти электроны полностью поглощаются эмульсией, то количество энергии, поглощенное 1 см^2 эмульсии, будет пропорционально $\cos \theta$. Если же пробег электронов значительно превосходит толщину эмульсии, то электроны будут терять в эмульсии лишь небольшую часть их энергии и поглощение энергии будет аналогично ее поглощению в случае рентгеновских лучей, т. е. можно ожидать слабых изменений плотности почернения с углом падения. Теперь мы можем сделать следующие предсказания: 1) при больших длинах волн будет происходить небольшое уменьшение плотности почернения с увеличением угла падения, как это следует из формулы (2); 2) после учета эффекта 1 останется еще «нехватка плотности», которая будет весьма грубо пропорциональна $1 - \cos \theta$; 3) с уменьшением длины волны сначала будет происходить увеличение «нехватки плотности» согласно пункту 2, так как все большая часть полного почернения будет создаваться электронами, возникающими вне эмульсии; 4) при дальнейшем уменьшении длины волны «нехватка плотности» пройдет через максимум и начнет уменьшаться, поскольку все большая часть падающих электронов будет терять в эмульсии лишь небольшую долю своей энергии, и процесс поглощения станет аналогичным поглощению самих рентгеновских лучей.

Влияние угла падения было исследовано экспериментально с применением рентгеновских лучей с эффективной длиной волны 0,324, 0,110, 0,070, 0,040 и 0,020 Å. В опытах с двумя наиболее длинными волнами полоска пленки шириной 6 см помещалась в кассету из тонкой черной бумаги и сворачивалась в цилиндр диаметром 5 см эмульсионной стороной наружу вокруг катушки, состоящей из двух перспексовых дисков, поддерживаемых на расстоянии около 6 см друг от друга при помощи отрезка тонкой бамбуковой палки. При таком устройстве около центральных частей пленки имелось лишь немного материала, способного вызвать

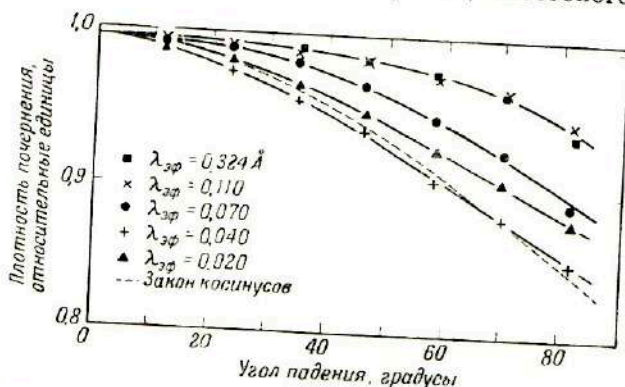


Рис. 3. Зависимость плотности почернения от угла падения рентгеновских лучей.

рассеяние рентгеновских лучей. Ось цилиндра располагалась перпендикулярно к пучку рентгеновских лучей. Таким образом пленка облучалась под всевозможными углами падения, которые легко могли быть вычислены в каждой точке пленки из геометрии установки. В опытах с более короткими волнами пленка в кассете из черной бумаги зажималась между двумя перспексовыми дисками толщиной 2,5 мм каждый. Такая толщина была достаточно для получения в эмульсии максимального электронного потока.

На рис. 3 показана измеренная зависимость плотности почернения от угла падения. Каждая кривая представляет результат усреднения данных по крайней мере 12 серий измерений плотности после введения небольшой поправки на изменения величины экспозиции вдоль поверхности пленки. Можно видеть, что все сделанные выше предсказания подтвердились на опыте. Пунктирная кривая изображает ожидаемый ход плотности почернения в том случае, если 18% полной плотности обусловлены электронами, которые не пронизывают эмульсию. Эта кривая довольно

хорошо согласуется с экспериментальными результатами для $\lambda_{эф.} = 0,040 \text{ \AA}$, хотя теоретическая кривая и является по необходимости весьма приближенной.

§ 6. Зависимость плотности почернения от длины волны рентгеновских лучей

Зависимость плотности почернения (на дозу в 1 рентген) от длины волны рентгеновских лучей представляет большой практический и теоретический интерес. Этот вопрос исследовался рядом авторов [2, 3, 7, 32—34]*. Авторы последних двух работ [34]* показали, что плотность почернения на 1 рентген строго пропорциональна энергии, поглощенной бромидом серебра на 1 рентген. Однако при вычислении этой поглощенной энергии ими было принято, что она поглощается бромидом серебра непосредственно из первичного пучка рентгеновских лучей, т. е. что поглощение может быть вычислено просто из массового коэффициента ослабления μ/ρ бромистого серебра. В действительности эта проблема значительно более сложна.

Потери энергии в результате рассеяния. Прежде всего, часть первичного пучка рассеивается, и энергия ее не превращается в энергию электронов. Поэтому следует пользоваться не коэффициентом μ , а коэффициентом ослабления $\tau + \sigma_a$, где τ и σ_a — линейные коэффициенты поглощения, обусловленные соответственно фотоэлектрическим поглощением и образованием электронов отдачи.

Потери энергии в результате флуоресценции. Другая часть фотоэлектрически поглощенной энергии снова испускается в виде характеристического излучения. Если фотоны энергии $h\nu$ поглощаются K -оболочкой атома, для которой энергия связи электрона равна $h\nu_K$, то доля этой энергии, приблизительно равная $h\nu_K\omega_K/h\nu$, излучается в виде характеристического излучения; ω_K — выход флуоресценции для K -оболочки. Вычисления показывают, что для нормальных фотографических эмульсий свыше 90% характеристического излучения покидает эмульсию (см. приложение). Подобные явления происходят и на L -оболочках, но они гораздо слабее и поэтому не были учтены. Доля поглощенной энергии рентгеновских лучей, переходящая в кинетическую энергию электронов, была вычислена для бромида серебра при допущении, что $\omega = 0,77$ для серебра и $\omega_K = 0,57$ для брома [35]. Значения коэффициента τ для серебра были взяты из литературных данных по поглощению, а для брома были вычислены по

* См. также статью 1, стр. 7.

общей формуле Викторийна [36]. Из этих данных были вычислены значения τ для бромида серебра как непосредственно, так и после умножения их на соответствующие значения множителя $1 - h\nu_K \omega_K / h\nu$ для учета энергии, снова испущенной в виде излучения флуоресценции. Основные данные суммированы в табл. 1. В последнем столбце таблицы приведен множитель F_1 , на который следует умножить $(\tau + \sigma_a)$ для вычисления энергии, превращенной в кинетическую энергию электронов. Можно видеть, что влияние этого множителя становится значительным при приближении к границе K -полосы поглощения серебра у $0,484 \text{ \AA}$.

Таблица 1
Значения $(\tau + \sigma_a)/\rho$ для серебра, брома и бромистого серебра и поправочный множитель F_1 на флуоресценцию бромида серебра

$\lambda, \text{ \AA}$	$(\tau + \sigma_a)/\rho, \text{ см}^2/\text{г}$			F_1
	Ag	Br	AgBr	
0,01	0,0248	0,0239	0,0244	1,00
0,02	0,0349	0,0285	0,0322	0,995
0,03	0,0540	0,0344	0,0456	0,977
0,04	0,088	0,0452	0,0700	0,960
0,05	0,128	0,0629	0,100	0,945
0,06	0,200	0,0897	0,153	0,929
0,08	0,441	0,177	0,329	0,897
0,10	0,791	0,321	0,591	0,868
0,12	1,29	0,534	0,969	0,840
0,15	2,34	1,01	1,78	0,798
0,20	5,1	2,32	3,92	0,731
0,25	9,7	4,41	7,45	0,663
0,30	15,7	7,45	12,2	0,598
0,35	24,1	11,2	18,6	0,530
0,40	35,7	16,8	27,7	0,464
0,45	49,3	23,4	38,3	0,397

Потери энергии в результате эмиссии электронов. Третьим осложняющим фактором при вычислении энергии, поглощенной самим бромидом серебра, является обмен электронами между бромидом серебра и окружающей желатиной и другими веществами с малым атомным номером.

Сначала рассмотрим энергию тех электронов, возникающих в бромиде серебра, которые теряются эмульсией. Эта задача сводится к нахождению той доли энергии электронов, освобожденных в бесконечном слое вещества, которая теряется этим слоем. Согласно Спайерсу [37], который исследовал аналогичную задачу, мы примем, что электроны испускаются изотропно и проходят

прямолинейные отрезки R , где R — «фольговый пробег» электронов*. Кроме того, мы примем, что пробег R и энергия E электрона связаны зависимостью $R = CE^{1,74}$, которая согласуется с пробегами, вычисленными Ли [38] для энергий от 2 до 200 кэв, и экспериментальными данными, наблюдаемыми Заяц и Россом [39]. Следовательно, электрон, проделавший долю p своего пробега, сохранит долю $(1-p)^{1/1,74}$ своей начальной энергии. Этим самым учитывается изменение удельной ионизации вдоль электронного следа.

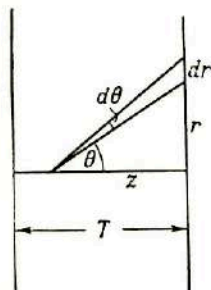


Рис. 4. Чертеж, поясняющий способ вычисления энергии электронов, покидающих слой вещества.

Если 1 см³ вещества испускает N электронов, то число их, испущенное между углами θ и $\theta + d\theta$ (рис. 4) элементом объема площадью dA и толщиной dz , равно $Ndz dA 2\pi r dr \cos \theta / 4\pi (r^2 + z^2)$. Энергия этих электронов, уходящая через правую поверхность слоя, равна

$$EN dz dA \frac{2\pi r dr \cos \theta}{4\pi (r^2 + z^2)} \left(1 - \frac{(r^2 + z^2)^{1/2}}{R}\right)^{1/1,74}. \quad (3)$$

Следовательно, полная энергия, освобождаемая в элементе объема $dz dA$ и уходящая через правую поверхность, равна

$$\frac{1}{2} EN dz dA z \int_0^{(R^2 - z^2)^{1/2}} \frac{r}{(r^2 + z^2)^{3/2}} \left(1 - \frac{(r^2 + z^2)^{1/2}}{R}\right)^{1/1,74} dr. \quad (4)$$

Численное интегрирование уравнения (4) для ряда значений z с последующим графическим интегрированием по z позволило вычислить ту долю полной энергии, освобожденной в слое вещества, которая была удержана материалом различной толщины T . Получены следующие результаты:

T/R	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Удержанная доля энер- гии . . .	0,149	0,243	0,323	0,395	0,458	0,514	0,565	0,612	0,649	0,684

Чтобы эти данные могли быть использованы для вычисления той доли энергии электронов, освобожденных в бромиде серебра эмульсии, которая удерживается эмульсией, необходимо знать пробег и энергию электронов.

* То есть найденный путем поглощения в последовательно увеличивающемся числе слоев фольги. (Прим. ред.)

Пробег электронов в фотографических эмульсиях. Полные исправленные значения пробега электронов в эмульсии Кодак NT4, измеренные и вычисленные Заяц и Россом [39], были пересчитаны в «фольговые пробеги» путем деления на 1,4 [40]. Эти значения оказались в хорошем согласии с величинами, приведенными у Герца [41]. Такие же величины были получены в результате деления значений пробега, приведенных у Ли [38], на плотность эмульсии, что позволило вычислить значения пробега электронов в более широком интервале энергии. Автор предположил, что этот последний метод дает правильные значения пробега электронов и в других эмульсиях.

Распределение по группам и энергии электронов, образовавшихся в бромиде серебра. Если поглощение некоторого числа квантов с энергией $h\nu$ приводит к вырыванию из атомов серебра N фотоэлектронов каждый с энергией $h\nu - h\nu_{\lambda\kappa}$, где $h\nu_{\lambda\kappa}$ — энергия, соответствующая границе K -полосы поглощения серебра, то $N(1 - \omega_{\lambda\kappa})$ атомов серебра будут возвращаться в свое основное состояние путем испускания одного или нескольких электронов Оже с полной энергией около $h\nu_{\lambda\kappa}$ ($\omega_{\lambda\kappa}$ — выход флуоресценции для K -оболочки серебра). Примем, что каждый из этих атомов испускает только один электрон Оже и что энергия последнего равна $h\nu_{\lambda\kappa}$.

Таблица 2

Распределение полной энергии электронов, освобожденных в бромиде серебра, между фотоэлектронами из серебра и брома, электронами Оже и электронами отдачи.

$\lambda, \text{\AA}$	Доля полной энергии электронов в группе, %				Электроны отдачи
	Ag (фото)	Br (фото)	Ag (Оже)	Br (Оже)	
0.01	3	1	0	0	96
0.02	16	3	0	0	81
0.03	34	8	0	0	58
0.04	49	12	1	0	38
0.05	58	15	1	0	26
0.06	63	17	2	1	17
0.08	68	21	3	1	7
0.10	69	22	4	1	4
0.12	68	23	5	2	2
0.15	65	26	7	2	0
0.20	60	27	10	3	0
0.25	55	28	13	4	0
0.30	48	28	18	6	0
0.35	39	29	24	8	0
0.40	28	31	31	10	0
0.45	14	32	41	13	0

Так как на каждый атом серебра приходится один атом брома, то атомами брома будет испущено $N[\tau_a(\text{Br})/\tau_a(\text{Ag})]$ фотоэлектронов с энергией $h\nu - h\nu_{\text{Br}}$, где τ_a — коэффициент фотоэлектрического поглощения, отнесенный к одному атому. Кроме того, атомы брома будут испускать $N[\tau_a(\text{Br})/\tau_a(\text{Ag})]$ электронов Оже. Итого получается четыре группы электронов. Зная относительные количества электронов в каждой группе и их энергии, можно вычислить относительные количества энергии электронов в четырех группах. Если первичные рентгеновские лучи монохроматичны,

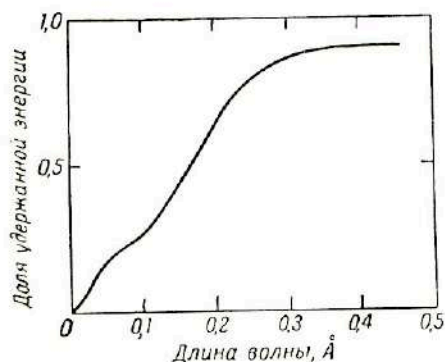


Рис. 5. Доля энергии электронов (образующихся в бромиде серебра) остающаяся в эмульсии штриховой пленки Ильфорд, как функция длины волны.

то все электроны одной группы будут обладать одинаковой энергией.

Часть полной энергии, существующая в виде кинетической энергии электронов *отдачи*, достигает заметной величины лишь для волн короче $0,15 \text{ Å}$. Полная энергия электронов отдачи вычислялась умножением полной энергии электронов четырех других групп на σ/τ для бромида серебра после введения поправки в τ на потери энергии в результате флуоресценции. Средние значения энергии электронов от-

дачи, созданных рентгеновскими лучами различной длины волны, приведены у Ли [42]. Доли полной энергии, приходящиеся на каждую группу, приведены в табл. 2 (см. стр. 37).

Автор вычислил для изученной эмульсии долю энергии электронов, освобожденную в бромиде серебра и удержанную эмульсией. Полученные результаты (рис. 5) показывают, что поправка на потери электронов из эмульсии весьма велика при малых длинах волн.

Потери энергии в желатине эмульсии. Не вся энергия электронов, оставшаяся в эмульсии, поглощается бромидом серебра — часть ее поглощается желатиной. При условии, что пробеги электронов в эмульсии велики сравнительно с размерами микрокристаллов и расстояниями между ними*, электронный поток через микрокристалл и прилегающий к нему слой желатины будет одно-

* В штриховой пленке Ильфорда средний диаметр микрокристаллов равен $0,24 \mu$, а расстояние между центрами микрокристаллов равно около $0,4\text{--}0,5 \mu$. Даже при длине волны $0,35 \text{ Å}$ пробег фотоэлектрона се-

роден и энергия электронов будет распределена между бромидом серебра и желатиной в отношении, равном отношению произведений из числа присутствующих электронов на тормозные способности, т. е.

$$\frac{\text{Энергия, поглощенная AgBr}}{\text{Энергия, поглощенная желатиной}} = \frac{\text{Масса AgBr}}{\text{Масса желатины}} \times \\ \times \frac{\text{Число электронов/г AgBr}}{\text{Число электронов/г желатины}} \times \\ \times \frac{\text{Тормозная способность AgBr на 1 электрон}}{\text{Тормозная способность желатины на 1 электрон}}.$$

Перепишем это выражение в виде $R_1 = R_m R_n R_s$. R_m равно отношению весов бромида серебра и желатины на единице площади пленки. Так как в 1 г бромида серебра содержится $2,65 \cdot 10^{23}$ электронов, а в 1 г желатины * $3,21 \cdot 10^{23}$ электронов, то $R_n = 0,825$. Средний атомный номер атомов бромида серебра равен 41,9, а желатины — 6,06. Отношение тормозных способностей электронов, соответствующее этим эффективным атомным номерам, равно 0,81 [44]. Следовательно,

$$R_1 = R_m \cdot \frac{2,65 \cdot 10^{23}}{3,21 \cdot 10^{23}} \cdot 0,81 = 0,67 R_m.$$

Доля энергии электронов, удержанная эмульсией и поглощенная бромидом серебра, равна $R_1/(1 + R_1)$. Для исследованной эмульсии эта доля равна 0,39.

Энергия, полученная бромидом серебра из окружающей среды. Для вычисления энергии, поглощенной бромидом серебра, следует учесть еще один фактор. Электроны, освобожденные в желатине эмульсии и в материале, окружающем эмульсию (основа пленки, кассета и т. д.), могут быть поглощены бромидом серебра. Рассмотрим один бромосеребряный микрокристалл в большом объеме желатины. Если пробеги электронов, освобожденных в желатине, велики сравнительно с размерами микрокристалла, то количества энергии, поглощенные бромидом серебра и желатиной за счет электронов, освобожденных в желатине, связаны выражением

$$\frac{\text{Энергия, эрг/г AgBr}}{\text{Энергия, эрг/г желатины}} = \frac{\text{Число электронов/г AgBr}}{\text{Число электронов/г желатины}} \times \\ \times \frac{\text{Тормозная способность AgBr на 1 электрон}}{\text{Тормозная способность желатины на 1 электрон}} = R_n R_s. \quad (5)$$

серебра в эмульсии приблизительно равен 5 диаметрам микрокристалла. Однако для более крупнодисперсной или более разбавленной эмульсии теория становится непригодной при более коротких волнах.

* Средний весовой состав фотографической желатины [43]: углерод 50,8%, водород 6,9%, азот 17,5%, кислород 23,9%, сера 0,9%.

Для данной дозы рентгеновских лучей энергия электронов, поглощенная граммом желатины, относится к энергии электронов, поглощенной граммом воздуха, как $[(\tau + \sigma_a)/\rho]_{\text{жел.}}/[(\tau + \sigma_a)/\rho]_{\text{возд.}}$ (флуоресценция этих веществ ничтожна и ее можно не учитывать). Следовательно,

$$\frac{\text{Энергия, эрг/г AgBr}}{\text{Энергия, эрг/г воздуха}} = R_n R_s \frac{[(\tau + \sigma_a)/\rho]_{\text{жел.}}}{[(\tau + \sigma_a)/\rho]_{\text{возд.}}} \quad (6)$$

В действительности желатина не является единственным веществом, в котором возникают электроны, поглощающиеся бромидом серебра, — некоторое количество электронов возникает в пленочной подложке и в кассете. Однако это не оказывает заметного влияния в том случае, если окружающие материалы имеют низкий атомный номер, поскольку при таких длинах волн, когда бромид серебра поглощает заметную долю полной энергии электронов, возникающих в окружающем материале, значение τ для такого материала ничтожно. Поэтому выражение (6) может быть написано в виде

$$\frac{\text{Энергия, эрг/г AgBr}}{\text{Энергия, эрг/г воздуха}} = R_n R_s \frac{(\sigma_a/\rho)_{\text{жел.}}}{(\sigma_a/\rho)_{\text{возд.}}} \quad (7)$$

Но σ_a/ρ пропорционально числу электронов на 1 г, следовательно,

$$\frac{\text{Энергия, эрг/г AgBr}}{\text{Энергия, эрг/г воздуха}} = R_s \frac{\text{Число электронов/г AgBr}}{\text{Число электронов/г желатины}} \times \frac{\text{Число электронов/г желатины}}{\text{Число электронов/г воздуха}} = \quad (8)$$

$$= R_s \frac{\text{Число электронов/г AgBr}}{\text{Число электронов/г воздуха}} \quad (9)$$

R_s имеет практически постоянное значение 0,81, будет ли окружающий материал пленочной основой, бумагой, картоном или перспексом. Подставляя соответствующие значения в выражение (9), получим

$$\frac{\text{Энергия, эрг/г AgBr}}{\text{Энергия, эрг/г воздуха}} = 0,81 \frac{2,65 \cdot 10^{23}}{3,01 \cdot 10^{23}} = 0,71. \quad (10)$$

Таким образом, энергия, поглощенная 1 г бромосеребряных микрокристаллов из окружающего материала малого атомного номера, пропорциональна энергии, поглощенной 1 г воздуха в той же самой точке. Так как количество энергии 84 эрг/г воздуха эквивалентно дозе в 1 рентген, то бромосеребряный микрокристалл получает из окружающей среды $84 \cdot 0,71 = 59,5$ эрг/г/рентген (при условии, что пробеги электронов превышают размеры микро-

кристалла и что фотографическое поглощение в окружающем материале ничтожно).

Пока мы рассмотрели одиночный микрокристалл, окруженный веществом с малым атомным номером. На практике мы имеем дело со многими микрокристаллами, а потому объем, занимаемый желатиной, меньше объема эмульсии на объем этих микрокристаллов. Поэтому энергия электронов, возникающих в желатине и других веществах с малым атомным номером и поглощенных бромидом серебра, будет несколько ниже вычисленной по формуле (10). В исследованной эмульсии бромид серебра занимал около 16% всего объема. Следовательно, вычисленное количество энергии, поглощенное бромидом серебра в результате захвата электронов, освобожденных в желатине, должно быть уменьшено на 16%. Эти электроны представляют собой электроны отдачи для той области длин волн, где на них падает значительная доля энергии, поглощаемой бромидом серебра. Поэтому та часть полной энергии, поступающей из материала с малым атомным номером, которая возникает в желатине, равна той доле энергии электронов отдачи, возникающих в бромиде серебра, которая остается в эмульсии. Вычисления, основанные на этой предпосылке, показали, что учет «объема желатины», занимаемого бромидом серебра, вызывает уменьшение полного количества энергии, поглощенной бромидом серебра, на 0, 4, 6, 3 1/2 и 1% при соответственно 0,01, 0,04, 0,06, 0,10 и 0,15 Å. Этой маленькой поправкой большей частью можно пренебречь.

Общее количество энергии, поглощенное бромидом серебра. Полученные выше результаты позволяют определить общее количество энергии, поглощенное бромидом серебра эмульсии. Так как дозу рентгеновских лучей обычно измеряют в рентгенах и так как 1 рентген эквивалентен поглощению примерно 84 эрг/г воздуха, то удобно будет сначала определить отношение энергии в эрг/г AgBr к энергии в эрг/г воздуха, а затем вычислить интересующую нас величину в эрг/г AgBr на 1 рентген.

Для рентгеновских квантов, поглощенных в самом бромиде серебра,

$$\frac{\text{Энергия, эрг/г AgBr}}{\text{Энергия, эрг/г воздуха}} = \frac{[(\tau + \sigma_a)/\rho]_{\text{AgBr}}}{[(\tau + \sigma_a)/\rho]_{\text{возд.}}} F_1 F_2 F_3, \quad (11)$$

где F_1 — поправочный коэффициент, учитывающий энергию, потерянную в результате флуоресценции (см. табл. 1), F_2 — поправочный коэффициент, учитывающий энергию электронов, потерянную эмульсией, и F_3 — поправочный коэффициент, учитывающий энергию, потерянную в желатине.

Бромид серебра поглощает часть электронов, освобожденных рентгеновскими квантами в окружающем веществе малого атомного номера. Для этой части энергии имеем

$$\frac{\text{Энергия, эрг/г AgBr}}{\text{Энергия, эрг/г воздуха}} = 0,71$$

[см. формулу (10)] для всех длин волн, при которых этот член имеет существенное значение. В очень точных работах следует вводить поправку на ту часть объема эмульсии, которая не занята желатиной.

Окончательно имеем для всех рентгеновских квантов:

$$\frac{\text{Энергия, эрг/г AgBr}}{\text{Энергия, эрг/г воздуха}} = \frac{[(\tau + \sigma_a)/\rho]_{\text{AgBr}}}{[(\tau + \sigma_a)/\rho]_{\text{возд.}}} F_1 F_2 F_3 + 0,71. \quad (12)$$

§ 7. Сравнение теории с экспериментом

Если число микрокристаллов, ставших проявляемыми, пропорционально энергии, поглощенной этими микрокристаллами, то величина отношения *плотность почернения/рентген* должна быть пропорциональна отношению энергий в формуле (12), при условии, что все экспозиции лежат в области, где плотность почернения пропорциональна экспозиции. Для исследования зависимости относительной плотности почернения на 1 рентген от длины волны применялось 30 неоднородных пучков рентгеновских лучей с эффективными длинами волн от 0,020 до 0,354 Å. Во всех случаях пленки получали такую экспозицию, чтобы плотность почернения составила около 0,5. Почернения от 10 пучков с эффективными длинами волн больше 0,07 Å были все получены на одном куске пленки размером 16 × 6 см. Этим самым было сведено к минимуму влияние неоднородности свойств эмульсии и условий проявления. Кроме того, распределение по поверхности пленки облученных участков, относящихся к каждой длине волны, было таково, что всякая неоднородность в свойствах эмульсии и условиях проявления приводила только к увеличению разброса точек вокруг кривой, связывающей отношение плотность/рентген с длиной волны, но не изменяла общую форму этой кривой. Подобные измерения, проведенные на пяти других полосках пленки, показали, что при учете небольших ($\pm 5\%$) колебаний в условиях проявления средняя вероятная ошибка в определении плотность/рентген была равна 1,8%.

При малых длинах волн трудно было полностью экранировать те участки пленки, которые не должны были подвергаться облучению. Поэтому не от всех пучков рентгеновских лучей могли

быть получены отпечатки на одной и той же полоске пленки. Для облучения лучами с $\lambda_{эф.} = 0,070, 0,040$ и $0,020 \text{ \AA}$ применялись отдельные пленки. Следовательно, при этих длинах волн вероятная ошибка в определении отношения плотность/рентген должна быть несколько больше, чем при более длинных волнах.

В качестве эффективной длины волны пучка лучей была принята длина волны некоторого монохроматического пучка, который имел такой же линейный коэффициент поглощения в слое серебра весьма малой толщины. Автор полагал, что определенная вышеуказанным способом эффективная длина волны будет приблизительно равна длине волны монохроматических лучей, испытывающих такое же поглощение в фотографической эмульсии.

На рис. 6 экспериментальные значения отношения плотность/рентген сравниваются с отношением энергий по формуле (12). По мнению автора, разброс точек обусловлен скорее ошибками в $\lambda_{эф.}$, чем ошибками в отношении плотность/рентген. В частности, нельзя ожидать, чтобы опытная кривая имела такой острый максимум в области $0,3 \text{ \AA}$, как максимум теоретической кривой, поскольку именно при этих более длинных волнах рентгеновские пучки были наиболее неоднородны.

Согласие между теорией и экспериментом, повидимому, оправдывает тот вывод, что для использованной эмульсии плотность почернения приблизительно пропорциональна энергии, поглощенной бромидом серебра в исследованном интервале длин волн. Следует, однако, помнить, что при выводе теоретической формулы было использовано большое количество опытных данных, некоторые из которых, например «фольговые пробеги» электронов, форма кривой энергии, удержанной эмульсией (см. рис. 5) и значения $\tau + \sigma_a$ для воздуха [45], нуждаются в дополнительной проверке.

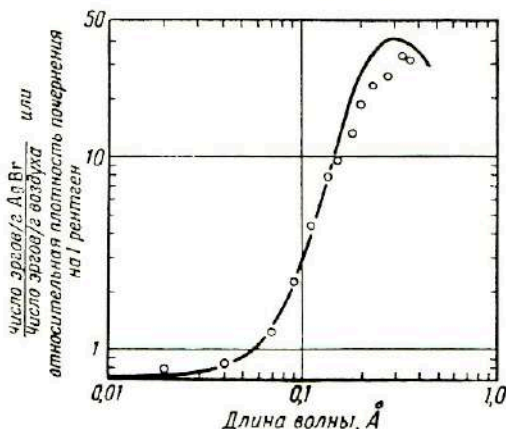


Рис. 6. Теоретическая кривая зависимости от длины волны величины отношения энергии, поглощенной 1 г бромида серебра, к энергии, поглощенной 1 г воздуха (сплошная кривая), и экспериментальные значения относительной плотности на 1 рентген (кружочки) для стриховой пленки Ильфорда.

§ 8. Обсуждение результатов

При использовании фотографических эмульсий для измерения дозы рентгеновских лучей, повидимому, можно не учитывать изменений интенсивности. При малых плотностях последние обычно пропорциональны экспозиции, и если исследование ограничено этим интервалом плотностей, то относительные экспозиции одной и той же пленки могут быть определены из относительных плотностей без строгого контроля условий проявления. При проведении исследований, в которых рентгеновские лучи падают на пленку под различными углами, следует помнить, что плотность почернения зависит от угла падения. Теоретический анализ этого явления показывает, что влияние изменения угла падения меньше для эмульсий с малым наносом серебра (малым количеством серебра на единице площади пленки). Во избежание ошибочных результатов пленка обычно должна быть окружена материалом малого атомного номера достаточной толщины, чтобы в эмульсии установилось электронное равновесие. Единственное исключение из этого правила, повидимому, встречается при исследовании поглощения энергии вблизи границы раздела между двумя различными средами. В задачу автора не входит подробное рассмотрение этих вопросов в настоящей статье.

Однако следует более подробно рассмотреть зависимость отношения плотность/рентген от длины волны, поскольку этот фактор накладывает наиболее сильные ограничения на применение современных фотографических эмульсий для измерения рентгеновских лучей.

Данные, полученные в настоящей работе, показывают, что между плотностью почернения и энергией, поглощенной бромосеребряными кристаллами, существует по крайней мере приближительная пропорциональность до $\lambda_{\text{эф.}} = 0,354 \text{ \AA}$. Если даже это справедливо и не для всех эмульсий и можно говорить только об увеличении плотности с количеством поглощенной энергии, то все же верно то, что любой метод уменьшения колебаний длины волны в той части излучения, которая поглощается бромидом серебра при получении эмульсий дозы в 1 рентген, должен уменьшать зависимость чувствительности от длины волны. Это может быть достигнуто путем уменьшения первого (зависящего от длины волны) члена в формуле (12) относительно второго (не зависящего от длины волны) члена. Такое уменьшение может быть осуществлено либо путем уменьшения F_2 (посредством уменьшения толщины эмульсии), либо путем уменьшения F_3 (посредством уменьшения отношения бромид серебра/желатина). Вычисления показывают, что для заданного уменьшения наноса серебра лучше понизить отношение бромид серебра/желатина, чем уменьшить толщину эмульсии. Автор полагает, что, используя

минимальные наносы серебра, практически допустимые для достижения требуемой оптической плотности, и практически максимальные толщины эмульсии, т. е. получая практически минимальное отношение бромид серебра/желатина, можно будет изготовить пленку, которая будет иметь достаточно постоянное отношение плотность/рентген для всех длин волн короче примерно $0,1 \text{ \AA}$ и у которой изменение отношения плотность/рентген с длиной волны будет значительно уменьшено для более длинных волн.

Такая пленка нашла бы широкое применение для измерения квантов весьма высокой энергии, испускаемых бетатронами, синхротронами, линейными ускорителями, генераторами Ван-де-Граафа и радиоактивными веществами. Если использовать такую пленку для измерения дозы рассеянного излучения, действующего на персонал, обслуживающий эти источники, то ее почернение можно будет выразить в рентгенах с большей точностью, чем это достижимо в настоящее время. Однако в этом случае трудно будет сохранить необходимую чувствительность.

В заключение можно отметить, что теория, изложенная в § 6, может быть применена для вычисления влияния толщины эмульсии и отношения серебро/желатина на чувствительность рентгеновских эмульсий. Тот факт, что при малых длинах волн значительная часть почернения создается электронами, освобожденными в результате поглощения квантов не в бромиде серебра, а в окружающем его материале, повидимому, указывает на то, что существующие термины «квантовая эффективность» и «квантовый выход» (т. е. число микрокристаллов, ставших проявляемыми при поглощении бромидом серебра одного кванта энергии) имеют довольно неопределенный смысл в применении к фотографическим измерениям жесткого рентгеновского излучения.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

«Самопоглощение» бесконечного слоя, изотропно испускающего электромагнитное излучение

Пусть толщина слоя будет T , а его линейный коэффициент поглощения для испускаемого им излучения — μ .

Если 1 см^3 испускает N квантов, то число квантов, испускаемое элементом объема площадью dA и толщиной dz между углами θ и $\theta + d\theta$ (см. рис. 4), равно

$$N dz dA 2\pi r (r^2 + z^2)^{1/2} d\theta / 4\pi (r^2 + z^2) = \frac{1}{2} N dz dA \sin \theta d\theta.$$

Число квантов между θ и $\theta + d\theta$, покидающих слой, равно

$$\frac{1}{2} N dz dA \sin \theta e^{-\mu z / \cos \theta} d\theta.$$

Полное число квантов из элемента объема, уходящих через правую поверхность слоя, равно

$$\int_{\theta=0}^{\pi/2} \frac{1}{2} N dz dA \sin \theta e^{-\mu z / \cos \theta} d\theta.$$

Полное число квантов из объема площадью dA и толщиной T , уходящих через правую поверхность, равно

$$\int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{z=0}^T \frac{1}{2} N dA \sin \theta e^{-\mu z / \cos \theta} d\theta dz.$$

Но полное число квантов из этого объема, испущенное по направлению к правой поверхности, равно $\frac{1}{2} NT dA$, следовательно, доля F , уходящая из слоя, равна

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{z=0}^T \sin \theta e^{-\mu z / \cos \theta} d\theta dz &= \frac{1}{\mu T} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta (1 - e^{-\mu T / \cos \theta}) d\theta = \\ &= \frac{1}{2\mu T} - \frac{1}{\mu T} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta e^{-\mu T / \cos \theta} d\theta. \end{aligned}$$

Полагая $\mu T / \cos \theta = y$, как обычно делается при решении таких интегралов, мы получим: $\sin \theta = -d(\cos \theta) = (\mu T / y^2) dy$, и

$$F = \frac{1}{2\mu T} - \mu T \int_{\mu T}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y^3} dy \quad (13)$$

или, так как $\int_{\mu T}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y^n} dy = \frac{1}{(\mu T)^{n-1}} \int_1^{\infty} \frac{e^{-\mu T y}}{y^n} dy$, то

$$F = \frac{1}{\mu T} \left(\frac{1}{2} - \int_1^{\infty} \frac{e^{-\mu T y}}{y^3} dy \right).$$

Таблицы для решения этого интеграла имеются в литературе [46]. Можно также проинтегрировать выражение (13) по частям 2 раза, тогда получим

$$F = \frac{1}{2\mu T} - \frac{e^{-\mu T}}{2\mu T} + \frac{e^{-\mu T}}{2} - \frac{\mu T}{2} \int_{\mu T}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy.$$

Табулирование этого интеграла проведено с большей полнотой [47—49]. Значение F для ряда значений μT приведены в табл. 3. Для значений μT , больших 5, $F = 1/2\mu T$ с погрешностью меньше 0,1%. Для более высоких значений μT доля излучения, покидающая слой, приблизительно равна $1/2\mu T$.

Таблица 3

Доля F излучения, уходящая из слоя толщиной T с линейным коэффициентом ослабления μ

μT	F	μT	F	μT	F
0,01	0,972	0,25	0,701	0,80	0,445
0,02	0,932	0,30	0,666	0,90	0,416
0,04	0,917	0,35	0,635	1,00	0,390
0,06	0,887	0,40	0,607	1,50	0,296
0,08	0,861	0,45	0,581	2,00	0,235
0,10	0,837	0,50	0,557	2,50	0,194
0,15	0,785	0,60	0,514	3,00	0,164
0,20	0,740	0,70	0,477	4,00	0,124

Чтобы использовать эти результаты при решении задачи о поглощении характеристического излучения фотографической эмульсией, автор принял, что отношение интенсивностей K_α - и K_β -линий серебра равно 4:1, откуда эффективная длина волны для K -серии серебра равна 0,546 Å и приближенное значение массового коэффициента ослабления μ/ρ для бромида серебра равно 24. Аналогичным образом для характеристического излучения брома эффективная длина волны принята равной 1,017 Å, а μ/ρ в бромиде серебра — равным 56.

Следовательно, для эмульсии, содержащей 0,001 г бромида серебра на 1 см², $\mu T = 0,024$ и 0,056 для характеристического излучения серебра и, соответственно, брома. Из табл. 3 находим, что свыше 90% характеристического излучения уходит из эмульсии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kronscke H., Ann. Physik, **43**, 687 (1914).
2. Friedrich W., Koch P. P., Ann. Physik, **45**, 399 (1914).
3. Glocker R., Traub W., Phys. Z., **22**, 345 (1921).
4. Bouwers A., Z. Physik, **14**, 374 (1923).
5. Dershem E., Phys. Rev., **42**, 908 (1932).
6. Luft F., Veröff. des Wiss. Zentral-Lab. Agfa, **3**, 245 (1933).
7. Bell G. E., Brit. J. Radiol., **9**, 578 (1936).
8. Mülbach E., Z. wiss. Photogr., **36**, 269 (1937).
9. Morgan R. H., Radiology, **42**, 471 (1944).
10. Tasker H. S., Photogr. J., **B85**, 75 (1945).
11. Rogers J. S., Proc. Phys. Soc., **43**, 59 (1931).
12. Rosenberger H., Goldhaber G., Strahlentherapie, **51**, 45 (1934).
13. Bell G. E., Brit. J. Radiol., **9**, 688 (1936).
14. Bothe W., Z. Physik, **8**, 243 (1922).
15. Ellis C. D., Wooster W. A., Proc. Roy. Soc., **A114**, 266 (1927).
16. Nacken M. J., Phys. Z., **31**, 296 (1930).

17. Becker A., Kipphan E., *Ann. Physik.*, **10**, 15 (1931).
18. Берг В., *Химия фотографических процессов*, сб., Издательство, 1951, стр. 77.
19. Silberstein L., *Phil. Mag.*, **44**, 257, 956 (1922).
20. Charlesby A., *Proc. Phys. Soc.*, **52**, 657 (1940).
21. Nutting P. G., *Phil. Mag.*, **26**, 423 (1913).
22. Brindley G. W., Spiers F. W., *Phil. Mag.*, **16**, 686 (1933).
23. Jauncey G. E. M., Richardson H. W., *J. Opt. Soc. Am.*, **24**, 125 (1934).
24. Hirsh F. R., *J. Opt. Soc. Am.*, **25**, 229 (1935).
25. Herz R. H., *Photogr. J.*, **B89**, 89 (1949).
26. Cowling R. F., Spalding C. K., *Radiology*, **52**, 423 (1949).
27. Cranberg L., Halpern J., *Rev. Sci. Instr.*, **20**, 641 (1949).
28. Broili H., Kiessig H., *Z. Physik*, **87**, 425 (1934).
29. Ibrahim, неопубликованные результаты.
30. Nicholson, частное сообщение.
31. Mayneord W. V., Roberts J. E., *Brit. J. Radiol.*, **10**, 365 (1937).
32. Berthold R., *Ann. Physik*, **76**, 409 (1925).
33. Berthold R., Glocker R., *Z. Physik*, **31**, 259 (1925).
34. Pele S. R., *Proc. Phys. Soc.*, **57**, 523 (1945).
35. Комптон А., Алисон С., *Рентгеновские лучи. Теория и эксперимент*, Л. — М., 1941.
36. Victoreen J. A., *J. Appl. Phys.*, **14**, 95 (1943).
37. Spiers F. W., *Brit. J. Radiol.*, **22**, 521 (1949).
38. Lea D. E., *Action of Radiations on Living Cells*, Cambridge, 1946, p. 24.
39. Zajac B., Ross M. A. S., *Nature*, **164**, 311 (1949).
40. Williams E. J., *Proc. Roy. Soc.*, **A130**, 310 (1931).
41. Herz R. H., *Phys. Rev.*, **75**, 478 (1949).
42. Lea D. E., *Action of Radiations on Living Cells*, Cambridge, 1946, p. 12.
43. Игода Г., *Радиография*, сб., Издательство, 1952, статья 12.
44. Gray L. H., *Brit. J. Radiol.*, **22**, 677 (1949).
45. Greening J. R., *Brit. J. Radiol.*, **21**, 75 (1948).
46. Placzek G., *Math. Tables Project, Rep. No. M. T. 1.*, 1945.
47. Glaisher J. W. L., *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **160**, 367 (1870).
48. Miller W. L., Rosebrugh T. R., *Trans. Roy. Soc. Canada*, **9**, 73 (1903).
49. *Tables of Sine, Cosine and Exponential Integrals*, Federal Works Agency, Works Projects Administration, N. Y., 1940.

3

*Д. Окрент и А. Соломон***ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭМУЛЬСИОННЫХ МИКРОКРИСТАЛЛОВ
К ЭЛЕКТРОНАМ**

D. Okrent, A. K. Solomon, *Phys. Rev.*, **83**, No 4, 826—833 (1951).

§ 1. Введение

При падении света надлежащей длины волны на фотографическую эмульсию некоторые из галоидосеребряных микрокристаллов (их число зависит от величины экспозиции, т. е. от произведения освещенности на длительность освещения) изменяются таким образом, что они начинают реагировать с определенными

восстановителями, известными под названием проявителей. Говоря точнее, микрокристаллы, получившие достаточную экспозицию, восстанавливаются проявителем до металлического серебра, в то время как другие вообще не восстанавливаются. Вещество или состояние, обуславливающее проявляемость, называется скрытым изображением; оно недоступно непосредственному наблюдению.

Скрытое изображение состоит из субмикроскопических частиц серебра надлежащей величины и расположения, способных вызвать проявление. Согласно теории образования скрытого изображения Гэрни и Мотта [1], поглощение кванта света эмульсионным микрокристаллом переводит связанный электрон в полосу проводимости или на экситонный уровень; далее экситон диссоциирует в результате теплового возбуждения. Свободные электроны мигрируют по решетке и захватываются дефектами кристалла; затем они нейтрализуются положительными ионами Ag^+ , диффундирующими к захваченным электронам. После того как этот процесс повторится достаточное число раз, на соответствующим образом расположенной точке образуется скрытое изображение.

Быстрая заряженная частица, ударяющая эмульсионный микрокристалл, должна оказывать такое же действие. Кулоновские силы освобождают связанные электроны вдоль пути частицы в микрокристалле, и если число освобожденных электронов достаточно, то образуется скрытое изображение. Если одна частица не сообщила микрокристаллу достаточной энергии, то нужно, чтобы в один микрокристалл попало несколько частиц.

Для частиц разного заряда, энергия которых недостаточна для создания минимальной ионизации окружающей среды, удельные потери энергии будут почти обратно пропорциональны энергии частицы. Чем больше энергия падающей частицы, тем меньше удельные потери энергии. Уэбб [2] дал теоретические кривые удельных потерь энергии в воздухе для α -частиц, дейтронов, мезонов и электронов, основанные на вычислениях для протона, выполненных Смитом [3].

Для α -частиц полония удельные потери энергии столь велики, что число электронов, освобожденных в микрокристалле, пересеченном частицей, значительно превышает минимальное их число, необходимое для образования скрытого изображения. Уэбб [4] нашел, что вероятность проявления* в этом случае равна единице. Для α -частиц с энергией 380 Мэв вероятность проявления еще столь велика, что в ядерных пластинках создается различимый след. Понятно, что в начале следа, где энергия частицы

* Вероятность проявления определяется как вероятность образования проявляемого скрытого изображения на микрокристалле, пересеченном падающей частицей.

велика, промежутки между зернами значительно больше, чем в конце следа, так как в начале следа не каждый пересеченный частицей микрокристалл получит достаточное для образования скрытого изображения число свободных электронов.

Чем меньше масса частицы, тем при той же энергии частицы пропорционально меньше удельные потери энергии, а следовательно, и вероятность проявления.

Чувствительность фотографических эмульсий к электронам измерялась многими авторами [5—9]. Результаты всех этих измерений представлены в виде обычных характеристических кривых (оптическая плотность как функция экспозиции), причем оптическая плотность определена как десятичный логарифм отношения интенсивности падающего луча света к интенсивности света, прошедшего проявленным серебром эмульсии. Все измерения проводились на сравнительно толстых эмульсиях с многослойным расположением микрокристаллов, в которых падающие частицы теряли если не всю энергию, то значительную часть ее. Эти измерения имели своей целью определение не чувствительности индивидуальных микрокристаллов, а скорее валовой чувствительности эмульсии. Напротив, целью настоящей работы было прямое измерение вероятности проявления индивидуальных эмульсионных микрокристаллов, облученных моноэнергетическими электронами с энергией от 7 до 115 кэв. Во избежание «усреднения» в процессе расходования электроном энергии при прохождении через эмульсию применялись специальные однослойные эмульсии. Применение таких однослойных эмульсий позволяло также визуально подсчитывать отдельные микрокристаллы при помощи микроскопа.

Пленки облучались в потоке моноэнергетических электронов с равномерным распределением плотности пучка; энергию частиц изменяли в указанных выше пределах. После фотографической обработки эмульсии непосредственно подсчитывались проявленные зерна, а число исходных непроявленных микрокристаллов до облучения определялось обычным способом. Исходя из этих данных и среднего размера микрокристалла, статистическим методом определялась вероятность проявления.

§ 2. Аппаратура

Пучок электронов получался при помощи специально сконструированной электронной пушки [10]. Эта пушка, изображенная на рис. 1, состояла из трех основных частей: вольфрамовой нити, нагреваемой от батареи, сетки с сопротивлением смещения и цилиндрического анода. Сечение электронного пучка ограничивалось маленьким отверстием (диафрагмой), после которого помещался фарадеев цилиндр, служивший для измерения силы тока

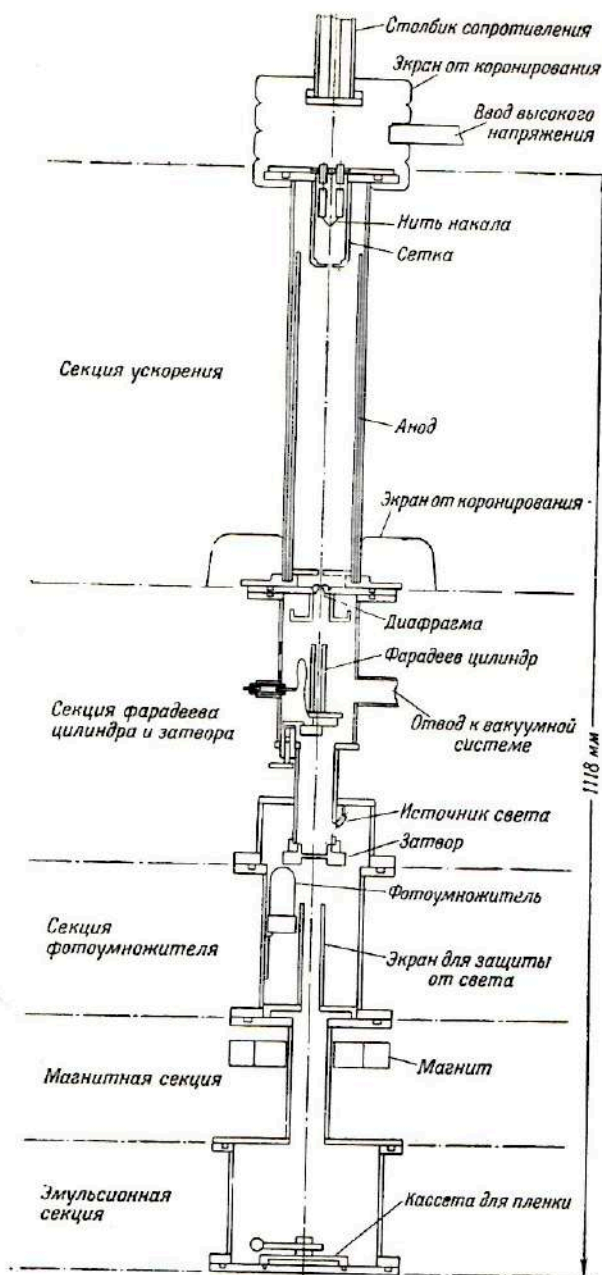


Рис. 1. Схематический чертеж (в масштабе) электронной пушки для облучения однослойных пленок моноэнергетическим электронным пучком.

пучка. При отведении фарадеева цилиндра в сторону от пучка последний одновременно прерывался затвором камеры, расположенным на пути пучка к пленке. Длительность облучения измерялась фотоэлектрически. При помощи магнита, отклоняющего электронный пучок, можно было сообщать каждому образцу пленки несколько экспозиций.

Значительные изменения силы тока пучка производились путем изменения сопротивления смещения и изменения расстояния между нитью накала и сеткой. Более тонкое регулирование тока осуществлялось путем изменения температуры нити накала.

Ток электронного пучка из фарадеева цилиндра проходил по экранированному и изолированному проводнику на вход электрометра, где он протекал через калиброванное сопротивление, давая постоянный сигнал. Отсчеты по электрометру производились до и после каждого облучения и бралась средняя величина. По оценке авторов, абсолютная ошибка в определении силы тока пучка составляла 2,5%, а воспроизводимость отдельных измерений — 1,5%. Ошибка в определении длительности экспозиции фотоэлектрическим методом составляла 0,75%.

Ускоряющее напряжение создавалось выпрямителем постоянного тока; точность регулировки была лучше 1%. Измерение ускоряющего напряжения производилось с погрешностью меньшей 2% с помощью столба сопротивления.

Объем пространства аппаратуры электронной пушки равнялся 6 л. При каждой смене пленки электронная пушка сообщалась с наружной атмосферой. Для быстрой откачки всей системы применялся масляный диффузионный насос типа VMF-50. Он позволял получать рабочее разрежение 10^{-4} мм рт. ст. за достаточно короткое время.

§ 3. Методика проявления

Пленка помещалась в электронную пушку, облучалась, извлекалась из нее и проявлялась в полной темноте. Обычно каждая полоска пленки облучалась три или четыре раза. Каждая эмульсия поливалась на длинную пленку, которая затем наматывалась на катушку. При работе с пленкой следовало соблюдать особые предосторожности, так как она не была покрыта защитным слоем желатины, иногда поливаемым на обычные эмульсии. Поэтому применявшаяся пленка была особенно чувствительна к механическим воздействиям (давление и царапины).

Во избежание регрессии скрытого изображения все пленки проявлялись не позже чем через 30 мин. после облучения. Температура проявителя регулировалась при помощи большой водяной бани с точностью до $\pm 0,3^\circ$. Для контроля температуры термометр помещался в проявитель непосредственно перед проявлением.

Были исследованы три однослойных пленки, две из которых проявлялись в одинаковых условиях. Две пленки (обозначенные J-4916 и J-8957) проявлялись в свежем проявителе D-19 при 20° в течение 80 сек., погружались в быстро действующую останавливающую ванну, тщательно промывались и подвешивались для высушивания. Поскольку сосчитывались как проявленные, так и непроявленные зерна, то эти пленки не фиксировались. Вуаль была значительна и увеличивалась со временем проявления, поэтому последнее было ограничено 80 сек.

В третьей пленке (J-10217) эмульсионные микрокристаллы имели значительно меньшие размеры, и концентрация их была весьма высока. При увеличении в 2500 раз было крайне трудно сосчитать полное число зерен на достаточно большом поле зрения. Невозможно было точно отличить проявленные зерна от непроявленных. Поэтому эту пленку после проявления приходилось фиксировать. Время проявления было увеличено до 3 мин., что увеличивало размеры и плотность проявленных зерен и тем самым облегчало их подсчет.

Все три пленки были специально изготовлены исследовательской лабораторией фирмы Истмэн Кодак *. Первые две пленки (J-4916 и J-8957) были изготовлены в различное время, но из основной эмульсии одного типа (хлоробромосеребряной). При изготовлении второй пленки техника эмульсификации была слегка изменена. Стандартные испытания по инструкции фирмы Истмэн показали, что эти две пленки обладали сравнимой чувствительностью к белому свету (во всяком случае, по чувствительности они отличались не более чем в 2 раза). Третья пленка (J-10217) была полита бромодосеребряной эмульсией с более мелкими микрокристаллами и имела совершенно иные характеристики, чем первые две пленки. Она походила на эмульсии, используемые для приготовления ядерных пластинок.

§ 4. Методика счета зерен

Прежде чем приступать к счету зерен, следовало определить площадь поперечного сечения электронного пучка путем измерения размеров пятна на пленке. Эта величина нужна для определения электронной плотности на единице площади. Так как пятна были малы ($0,2 \text{ см}^2$), овальной формы, слабы и не резко ограничены, то это оказалось довольно трудной проблемой. В связи с этим было решено увеличить пятно проектированием, скопировать изображение и сравнить его площадь с площадью спроекти-

* На пленочную подложку наносился чистый желатиновый слой, который поливался весьма тонким слоем галодосеребряной эмульсии. Эти пленки были специально приготовлены для наших опытов, в продаже они отсутствуют.

рованного стандарта. Площади сравнивались путем взвешивания на аналитических весах вырезанных из бумаги фигур сравниваемых сечений.

Зерна подсчитывались при помощи микроскопа Бауша и Ломба с иммерсионным апохроматическим объективом и бинокулярными окулярами 25X. Для уменьшения поля счета вставлялся окулярный диск с квадратной сеткой, и подсчитывались только зерна, находившиеся в одном квадрате.

У первых двух пленок вуаль была весьма велика — порядка одного зерна из девяти. Так как для уменьшения вероятности многократных попаданий частиц в один и тот же микрокристалл пленке сообщались малые экспозиции и так как пленки оказались довольно нечувствительными к электронам, то число зерен вуали превосходило число зерен, затронутых электронами. Поэтому результаты счета зерен были довольно плохо воспроизводимы — колебания превышали 20%.

В литературе описаны различные методы удаления вуали до облучения. Однако возможность неравномерной обработки и другие аналогичные соображения исключали применение подобных методов в наших опытах.

К счастью, третья пленка (J-10217) практически не имела вуали, и результаты измерений в этом случае были воспроизводимы. Этой пленке сообщали целый ряд экспозиций для каждого значения энергии электронов. Если не все пятна были достаточно черны для измерения площади, то измерялись только наиболее темные пятна и результаты использовались для всех экспозиций. Такой способ не позволял точно измерять площади пятен. Полученные данные колебались в пределах немногих процентов, и поэтому через точки, представляющие зависимость площади от энергии, проводилась плавная усредненная кривая.

Участки для просмотра отбирались наугад. Так как непроявленные зерна удалялись при фиксировании, то на каждом участке определялось только число проявленных зерен и вычислялась средняя величина для всех образцов. Затем определялось полное число зерен в исходной пленке на площади, равной площади участка для счета. Для этого определялось число зерен как в непроявленной, так и в полностью засвеченной и проявленной пленке.

Предполагалось, что исходное число неэкспонированных зерен на единицу площади участка счета существенно не изменяется вдоль длины пленки. Так как серии данных при различных ускоряющих напряжениях отбирались в произвольном порядке, то отклонение от этого предположения не привело бы к значительным ошибкам. Для разных экспозиций число сосчитанных зерен изменялось от немногих сотен до свыше тысячи. Подсчитывались все зерна, за исключением комков зерен. Комкование зерен было

незначительным, и при малых экспозициях оно практически отсутствовало. При весьма больших экспозициях, особенно при низких ускоряющих напряжениях, число зерен становилось столь значительным, что точный счет сильно затруднялся и ошибки возрастали.

§ 5. Результаты

Результаты для первой пленки (J-4916, хлорбромосеребряная эмульсия) показаны на рис. 2. Два различных способа выражения чувствительности этой эмульсии представлены графически

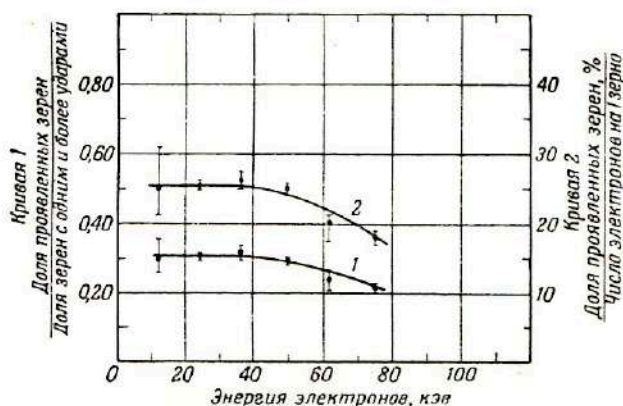


Рис. 2. Вероятность проявления (кривая 1) и валовая чувствительность (кривая 2) для первой пленки (J-4916, хлорбромосеребряная) как функция энергии электрона.

Все данные относятся к экспозициям, при которых вероятность одного или более ударов на зерно лежит между 0,24 и 0,35.

как функция энергии падающих электронов. На левой оси ординат отложено отношение доли проявляемых зерен к доле зерен, затронутых одним или более электронами. Фактически это отношение представляет вероятность проявления * зерна при попадании одного электрона, так как вероятность многократных ударов мала.

На правой оси ординат для второй кривой отложено отношение доли проявленных зерен к числу электронов на 1 зерно. Эта величина является мерой валовой чувствительности пленки. Она особенно пригодна для сравнения первых двух пленок, которые облучались электронами весьма различной интенсивности. Погрешности отдельных данных указаны вертикальными отрезками,

* Метод вычисления вероятности проявления, а также данные для одного опыта, выбранного в качестве примера, приведены в приложении.

проходящими через точки, представляющие средние значения. Вначале разброс был значительно больше, однако он был уменьшен путем повторных (2—3 раза) подсчетов. Авторы использовали только те экспериментальные точки, для которых вероятность одного или более ударов электрона в зерно лежала между 0,24 и 0,35. Данные для немного более высоких интенсивностей электронного пучка выпадают из кривой, не задевая ее своими отрезками погрешностей.

Полученные данные недостаточно надежны для точного определения формы кривой. Можно лишь констатировать, что кривая

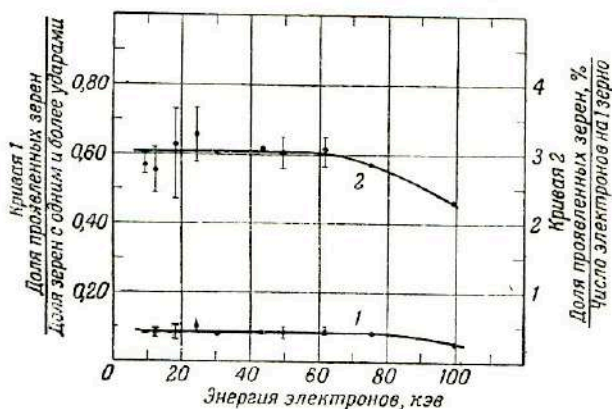


Рис. 3. Вероятность проявления (кривая 1) и отношение доли проявленных зерен к числу электронов на 1 зерно (кривая 2) для второй пленки (J-8957, хлоробромосеребряная) как функция энергии электрона.

Вероятность одного или более ударов на зерно лежит между 0,87 и 0,95 для всех экспериментальных точек. При такой большой экспозиции кривая 2 становится более пригодным критерием для сравнения с первой пленкой.

идет сравнительно горизонтально до 50 кэВ, после чего чувствительность медленно уменьшается.

Результаты для второй пленки (J-8957, также хлоробромосеребряная эмульсия) показаны на рис. 3. На ординатах и абсциссе отложены те же величины, что на рис. 2. В случае энергий, для которых имелась только одна экспериментальная точка, разброс данных не показан, хотя всегда наблюдалось значительное колебание результатов повторных измерений.

Общая форма кривых и разброс данных аналогичны таковым для первой пленки. Чувствительность оставалась довольно постоянной до 60 кэВ, а затем медленно падала. Кривая 1 на рис. 3 выглядит более пологой вследствие меньших значений ординат. Однако абсолютная чувствительность второй пленки

была значительно меньше, чем первой, несмотря на тот факт, что фирма предполагала выпустить весьма близкие по свойствам пленки. Действительно, грубые испытания, произведенные фирмой Истмэн, показали, что при облучении рентгеновскими лучами с напряжением генерирования 100 кэв обе пленки давали равные плотности для равной экспозиции. Кроме того, при освещении белым светом колебания плотности не превосходили двукратных.

Результаты, полученные в этом опыте, показывают, что эти две пленки сильно отличаются по своей чувствительности к электронам. Если сравнивать вероятности проявления, то окажется, что первая пленка приблизительно в 4 раза чувствительнее второй. Однако, для того чтобы получить видимое пятно, на второй пленке необходимы значительно большие чем в 4 раза интенсивности электронного пучка. Для приведенных на графике данных вероятность одного или более ударов электрона в зерно лежит между 0,87 и 0,95. При такой большой вероятности закон малых чисел Пуассона говорит, что дополнительные электроны имеют сравнительно небольшую вероятность попадания в еще не затронутое зерно. Следовательно, сравнение валовых чувствительностей, выраженных через отношение доли проявленных зерен к количеству электронов на 1 зерно, показывает, что чувствительность первой пленки в 8—9 раз выше, чем второй.

Если сравнить результаты по электронной чувствительности пленок с испытаниями фирмы Истмэн, проведенными с помощью белого света, то можно заключить, что относительные чувствительности к электронам отличаются от относительных светочувствительностей. По этому вопросу имеются еще другие данные [11].

Наблюдаемое расхождение между чувствительностью к рентгеновским лучам и к электронам непонятно. Действительно, рентгеновские лучи оказывают фотографическое действие через посредство фотоэлектронов высокой энергии, поэтому можно было ожидать параллелизма в действии рентгеновских лучей и электронов. Следует отметить, что точность испытаний с рентгеновскими лучами была довольно мала, так как оптические плотности были малы.

Результаты для третьей пленки (J-10217, бромонодосеребряная эмульсия) изображены на рис. 4, а и б. При каждом значении ускоряющего напряжения пленка облучалась в электронном пучке, интенсивность которого изменялась в широких пределах. Для каждого ускоряющего напряжения доля проявленных зерен нанесена на график как функции числа электронов на 1 зерно. (Среднее измеренное поперечное сечение отдельного зерна в этой эмульсии составляло $0,9 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2 \pm 8\%$. Зерна имели главным образом сферическую форму.) Через экспериментальные точки проводились прямые по методу наименьших квадратов.

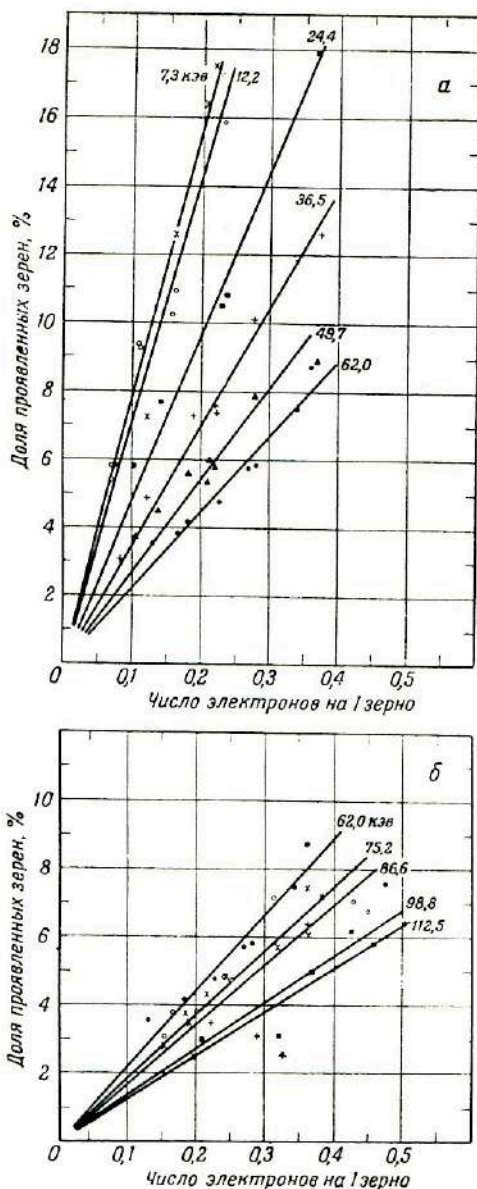


Рис. 4. Кривые зависимости доли проявленных зерен от экспозиции в электронах на зерно при энергиях электронов: а — от 7,3 до 62,0 кэв и б — от 62,0 до 112,5 кэв для третьей пленки (J-10217, бромодосеребряная).

Эта пленка полита эмульсией, аналогичной ядерным эмульсиям.

На рис. 5 изображена зависимость вероятности проявления от энергии электрона для третьей пленки. Данные для построения этой кривой получены из кривых, изображенных на рис. 4, а и б. Для этого по кривым определяли долю проявленных зерен, соответствующую значению 0,2 электрона на зерно для всех напряжений, и далее вычисляли долю зерен, получивших один или более

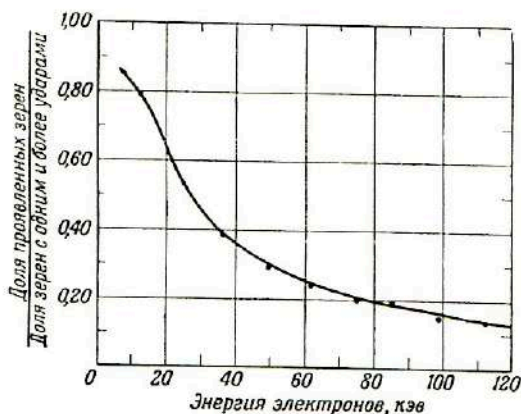


Рис. 5. Зависимость вероятности проявления от энергии электронов для пленки J-10217.

Эта кривая получена из кривых, изображенных на рис. 4, а и б, путем определения по этим кривым доли проявленных зерен, соответствующей 0,2 электрона на зерно (произвольный выбор) для всех напряжений, и соответствующих вычислений.

ударов (которая, конечно, была постоянной для всех напряжений). Если исходили из другого числа электронов на зерно, то абсолютные значения вероятности проявления слегка изменялись, но форма кривой оставалась прежней.

Результаты для этой пленки сильно отличаются от результатов для первых двух пленок. Так, кривая чувствительности не имеет длинного горизонтального участка, а сразу резко падает от максимального значения при малых энергиях. Форма кривой в области ниже 15 кэв не могла быть определена с достаточной точностью, так как при 7 кэв данные были довольно плохо воспроизводимы.

Из рис. 4 видно, что для низких и средних экспозиций доля проявленных зерен является линейной функцией числа электронов на 1 зерно. Для исследования формы кривой при более высоких экспозициях были получены дополнительные данные для двух напряжений (18,3 и 75,2 кэв) в широком интервале экспозиций. Результаты приведены на рис. 6. Как и ожидалось, доля проявленных зерен сначала линейно возрастает с увеличением

числа электронов на зерно, а затем рост замедляется. По крайней мере часть этого уменьшения наклона обусловлена расходом электронов на уже проявляемые зерна. Этим объясняется, почему кривая для низкой энергии раньше начинает отклоняться от прямой, чем кривая для высокой энергии.

Интересно отметить, что при нанесении на график доли проявленных зерен в зависимости от числа зерен, затронутых одним или более электронами, получаются прямые во всем интервале

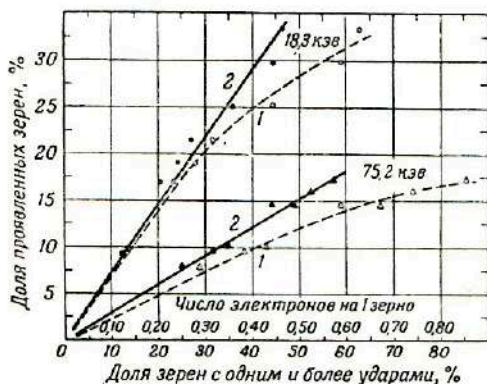


Рис. 6. Кривые зависимости доли проявленных зерен от числа электронов на зерно (кривая 1) и от доли зерен, получивших один или более ударов (кривая 2), для энергий 18,3 и 75,2 кэВ и пленки J-10217.

исследованных экспозиций. Данные для 75,2 кэВ можно вполне точно представить прямой линией; для 18,3 кэВ кривая менее определена.

Если бы вероятность проявления оставалась постоянной для каждого соударения электрона с зерном, независимо от предыдущих соударений, не вызвавших проявляемости, то кривая зависимости доли проявленных зерен от доли зерен, получивших один или более ударов, была бы прямой линией с наклоном 45° при вероятности проявления, равной единице. При более низких вероятностях кривая вначале должна лежать ниже прямой с наклоном 45° , а далее круто подниматься и пересекать эту прямую в точке, соответствующей 100% проявленных зерен. Эти условия, вероятно, не отвечают действительному положению вещей, так как электрон, который хотя и не сообщил зерну проявляемость, может все-таки освободить некоторое число связанных электронов в зерне галогенида серебра. Поэтому можно ожидать, что на долю второго электрона достанется более легкая задача.

Данные, изображенные на рис. 6, были получены позже данных, показанных на рис. 4. Поэтому свойства пленки могли за это время измениться. Кроме того, счет зерен также производился в различное время, так что отбор участков для счета (довольно произвольная операция), вероятно, несколько отличался от предыдущего. Во всяком случае, чувствительность при обоих напряжениях на рис. 6 на 20 % выше, чем на рис. 4. То же имело место и для некоторых отдельных данных, полученных при других напряжениях. Это колебание чувствительности, главным образом абсолютной, является дополнительным указанием на трудности, связанные с измерениями чувствительности фотографических эмульсий.

§ 6. Источники ошибок

В параграфе 2 указано, что ошибки, связанные с отсчетами по различным измерительным приборам, были малы, а именно, порядка 2 %. Однако значительно большие ошибки были связаны с измерениями площадей пятен и введением поправки на вуаль для двух первых пленок. Эти погрешности в совокупности с ошибками, вводимыми в процессе счета зерен, полностью маскируют луюбую из ошибок показания приборов.

Авторы полагали, что оценка воспроизводимости и абсолютной точности данных, представленных на рис. 2 и 3, величиной порядка 20 % была бы несколько оптимистичной. Благодаря отсутствию вуали результаты для третьей пленки были значительно более воспроизводимы. По оценке воспроизводимости данных, изображенных на рис. 4, *a* и *b*, составляет 10 %, а абсолютная погрешность — 20 %.

Пока еще мы не рассматривали поправки на обратное рассеяние электронов. Несомненно, что некоторые из падающих электронов соударялись с ядрами или связанными электронами в желатиновом слое и в сложных эфирах целлюлозы подложки (после прохождения через слой галоидосеребряных зерен). Однако оказалось, что в наших опытах эффект обратного рассеяния был незначителен. По формуле Мотта или Резерфорда можно вычислить, что в результате однократного рассеяния электронов ядром с атомным номером 4 всего 1 % падающих электронов рассеивается в обратном направлении.

Негер [12] определил экспериментально, что полное обратное рассеяние моноэнергетических быстрых электронов от тонких и толстых фольг имеет тот же порядок, что рассеяние, вычисленное по теории Мотта, если пренебречь обратным рассеянием электронов весьма малой энергии. Работа Цумвальта [13] по обратному рассеянию β -лучей показывает, что менее 4 % частиц, падающих на однослойный препарат эмульсии, рассеивается в обратном направлении.

Учитывая значительно большие погрешности, вносимые другими факторами, авторы полагали нецелесообразным вносить поправки на обратное рассеяние электронов.

§ 7. Обсуждение результатов

Можно оценить чувствительность эмульсионных микрокристаллов к частицам различной энергии путем определения изменения плотности зерен вдоль следов частиц в ядерных пластинках. Результаты измерения плотности зерен вдоль следов β -частиц опубликованы в работах Росса и Заяц [14, 15]. В первой работе приводится зависимость плотности зерен от расстояния от конца следа для электронов с энергией 100 кэв в некоторой экспериментальной эмульсии. В этой работе учитывались только неразветвленные следы, начинающиеся от поверхности эмульсии с начальным углом наклона к направлению первичного пучка электронов не более 40° . Боковые ответвления создавались δ -электронами и не могли быть надежно идентифицированы, если их энергия была меньше 20 кэв.

Во второй работе приведены средние плотности зерен в следах электронов с энергией около 250 кэв в пластинках Кодак NT4. В этой работе в число зерен на каждом участке следа включены зерна, принадлежащие к ответвлениям на том же участке.

Эти данные по плотности зерен могут быть пересчитаны в кривые относительной вероятности проявления как функции энергии электрона. Для этого следует использовать экспериментальные данные по зависимости пробег — энергия, приведенные в этих двух работах. Результаты приблизительных вычислений такой зависимости приведены на рис. 7. В тех же координатах изображены результаты для третьей пленки (J-10217) и приближенная кривая удельных потерь энергии электрона как функции энергии электрона. Сходство двух последних кривых очевидно; результаты, полученные из данных Росса и Заяц, находятся в хорошем качественном и удовлетворительном количественном согласии с этими кривыми.

Данные по плотности зерен в следах тяжелых частиц, включая α -частицы, тритоны, дейтоны, протоны и мезоны, приведены в ряде работ [16—19]. В одной работе [17] приведены данные по изменению плотности зерен в наиболее длинных следах, а именно длиной 2150 μ , соответствующих протонам с энергией 21 Мэв. Пользуясь кривой пробег — энергия для протонов, установленной Уэббом [2], авторы вычислили из этих данных относительную вероятность проявления как функцию энергии протона. Результаты пересчета приведены в верхнем правом углу рис. 7 совместно с приближенной кривой удельных потерь энергии протона. Эти две кривые не совпадают в этом ограниченном интервале энер-

гий протонов, хотя и обладают близкой кривизной. Здесь мы имеем дело с областью высокой вероятности проявления, и поэтому трудно ожидать, что кривая вероятности проявления будет расти столь же круто, как кривая удельных потерь энергии, так как первая кривая стремится к предельному значению, равному 1.

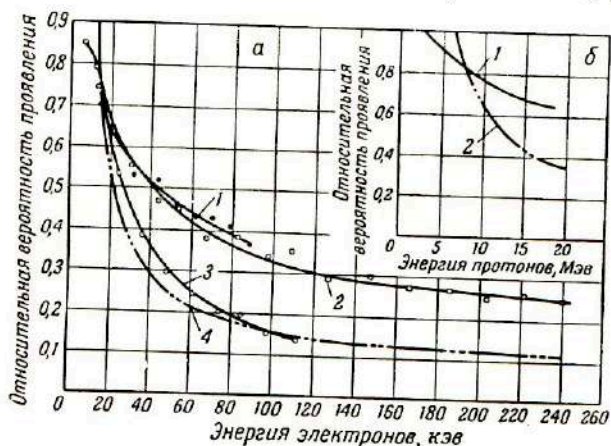


Рис 7. Зависимость относительной вероятности проявления от энергии электронов, вычисленная из результатов счета зерен в следах электронов в экспериментальной эмульсии [14] и в пластинках Кодак NT4 [15].

Для сравнения приведены результаты для пленки J-10217, а также приближенная кривая удельных потерь энергии электронов. В правом верхнем углу сравниваются кривая относительной вероятности проявления, вычисленная из результатов счета зерен вдоль следов протонов в пластинках Ильфода [17], и приближенная кривая удельных потерь энергии протонов в узком интервале энергии.

а: 1—Росс и Заяц [14]; 2—Заяц и Росс [15]; 3—пленка J-10217; 4—удельные потери энергии электронов.

б: 1—Латесс и др. [17]; 2—удельные потери энергии протонов.

Данные для α -частиц и дейтонов [18] дали аналогичные результаты, однако опять-таки в этой работе исследован интервал энергий, соответствующий весьма большим удельным потерям энергии.

Полученные авторами результаты позволяют сделать еще некоторые дополнительные выводы. Узбб [4] нашел, что для проявляемости эмульсионного микрокристалла необходимо поглощение в среднем около 40 квантов света. Такой результат был получен при освещении однослойных фотографических пластинок, полных оптически не сенсibilизированной, малочувствительной, монодисперсной эмульсией, монохроматическим светом трех разных длин волн. С другой стороны, рассматривая предельную чувствительность ядерных пластинок производства 1948 г., Узбб

[2] нашел, что частица, отвечающая этому порогу, создавала 150 пар ионов на 1 зерно.

Результаты для третьей пленки показывают, что при 110 кэв еще сохраняется заметная чувствительность. Следуя Уэббу [2], мы можем оценить число пар ионов, образующихся при данной энергии электрона, и таким образом определить число пар ионов, необходимых для проявляемости зерна. Ван-Хеерден [20] (цитируется по Уэббу [2]) нашел, что при прохождении быстрой β -частицы через хлорид серебра для образования каждой пары ионов требуется 7,6 эв*. Из кривой удельных потерь энергии электрона авторы нашли, что при 110 кэв он теряет около 0,0045 Мэв/см воздуха. Максимальное число пар ионов, созданное в эмульсионном микрокристалле частицей с такими потерями энергии, может быть найдено путем умножения удельных потерь энергии в воздухе на тормозную способность бромида серебра относительно воздуха (3 000) и на диаметр микрокристалла (0,35 μ) и деления на число электронов-вольт, необходимое для образования одной пары ионов. Произведя эти действия, мы найдем:

число пар ионов на 1 зерно = $0,0045 \cdot 10^6 \cdot 3000 \cdot 3,5 \cdot 10^{-5} / 7,6 = 62$.

Эта приближенная величина представляет не среднее число пар ионов, возникающих вдоль прямолинейного пути частицы в микрокристалле и необходимых для его проявляемости, а скорее нижний предел этой величины. Не удивительно, что этот процесс менее эффективен, чем случайное поглощение световых квантов по объему микрокристалла. Так как все пары ионов образуются за очень короткий промежуток времени и на прямолинейном отрезке пути, то потери вследствие рекомбинации будут облегчены. Так, например, имеются прямые доказательства [2] малой эффективности фотографического процесса при весьма кратковременных (меньше 10^{-3} сек.) освещенностях сравнительно с его эффективностью при более продолжительных освещенностях (для равных экспозиций).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Вероятность проявления вычислялась следующим способом. Площадь облученного пятна берется из кривой зависимости площади пятна от энергии электрона. Среднее показание электрометра в милливольтках пересчитывается в число электронов и затем комбинируется с продолжительностью облучения и пло-

* Уитмор и Стрит [21] приводят величину $6,6 \pm 0,7$ эв, в то время как Гофштадтер и др. [22] получили ряд значительно больших величин. Авторы использовали данные Ван-Хеердена, чтобы результаты были непосредственно сравнимы с результатами Уэбба.

щадью пятна для определения числа электронов на 1 см^2 . Пользуясь этой величиной и средней измеренной площадью микрокристалла, по закону малых чисел Пуассона вычисляют долю микрокристаллов, затронутых одним или более электронами [4].

Долю полного числа присутствующих микрокристаллов, получившую способность проявляться, определяют из микроскопического счета зерен после поправки на вуаль. Частное от деления этой доли на долю затронутых электронами микрокристаллов равно вероятности проявления.

Типичные данные для одного снимка на пленке J-4916 приведены ниже:

Ускоряющее напряжение	49,7 кэв
Среднее показание электрометра	7,05 мв
Длительность облучения	0,150 сек.
Доля проявляемых микрокристаллов	0,101
Площадь пятна (взята из кривой)	0,183 см^2
Средняя площадь микрокристалла	$2,24 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$

Вспомогательное нагрузочное сопротивление на электрометре было $1,98 \cdot 10^8 \text{ ом}$, отсюда полный ток пучка был $3,56 \cdot 10^{-11} \text{ а}$, что соответствует плотности заряда $1,82 \cdot 10^8$ электронов на 1 см^2 пленки. Следовательно, число электронов на 1 микрокристалл достигало 0,407. По закону распределения Пуассона находим, что число микрокристаллов, получивших один или более ударов, равно 0,335, так что вероятность проявления равна 0,301.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герни Р., Мотт Н., Усп. Хим., **7**, 1755 (1938).
2. Уэбб Дж., УФН, **38**, 77 (1949).
3. Smith J. H., Phys. Rev., **71**, 32 (1947).
4. Webb J. H., J. Opt. Soc. Am., **38**, 312 (1948).
5. Baker, Ramberg, Hillier, J. Appl. Phys., **13**, 450 (1942).
6. Borries V. B., Physik. Z., **43**, 190 (1942).
7. Charlesby A., Proc. Phys. Soc., **52**, 657 (1940).
8. Кранберг Л., Халперн Дж., Радиография, сб., Издательство, 1952, статья 13.
9. Ellis C. D., Aston G. H., Proc. Roy. Soc., **A119**, 645 (1928).
10. Okrent D., диссертация, Гарвардский Университет (1950).
11. Yutzy H. C., частное сообщение.
12. Neher H. V., Phys. Rev., **38**, 1321 (1931).
13. Zumwalt L. R., MDDC-1346 (не опубликовано).
14. Ross M. A. S., Zajac B., Nature, **162**, 923 (1948).
15. Заяц Б., Росс М., Фотографический метод в ядерной физике, сб., Издательство, 1952, статья 29.
16. Wilkins T. R., St. Helens H. J., Phys. Rev., **54**, 783 (1938).
17. Lattes, Occhialini, Powell, Nature, **160**, 453 (1947).
18. Brock R. L., Gardner E., Rev. Sci. Instr., **19**, 299 (1948).
19. Beriman I. B., Phys. Rev., **80**, 96 (1950).
20. Van Heerden P. J., N. V. Noord-Hollandsche Uetgeverz Maatschappij (Amsterdam, 1945).
21. Whittmore W. L., Street J. C., Phys. Rev., **76**, 1786 (1949).
22. Hofstadter, Milton, Ridgeway, Phys. Rev., **72**, 977 (1947).

4

*П. Сельм***ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ МИКРОКРИСТАЛЛОВ БРОМИДА
СЕРЕБРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ.
НАБЛЮДЕНИЕ ПУТЕЙ МИГРАЦИИ ИОНОВ СЕРЕБРА
В ПРОЦЕССЕ СОЛЯРИЗАЦИИ**

P. Selme, Sci. Ind. fotogr., 22, No 10, 361—368 (1951).

Изменения микрокристаллов бромида серебра. Различные фотографические явления — образование скрытого изображения, соляризация, видимое почернение — обусловлены глубокими изменениями микрокристаллов бромида серебра, образующих фотографический слой.

Изучение этих изменений при помощи электронного микроскопа представляет многочисленные трудности, основные из которых указаны ниже.

1. Микрокристалл бромида серебра, находящийся на держателе образца, подвергается в электронном микроскопе интенсивной электронной бомбардировке. Однако интересующие нас явления протекают при экспозициях *, в 10^9 — 10^{10} раз меньших, чем экспозиции, сообщаемые кристаллу за время, минимально необходимое для его наблюдения в электронном микроскопе.

2. Так как микрокристаллы бромида серебра непрозрачны для электронного пучка, то те незначительные количества серебра, которые образуют скрытое изображение, не могут быть обнаружены на снимке, даже если бы все это серебро было собрано в одной точке.

С другой стороны, различные побочные эффекты, особенно тепловые, затрудняют наблюдение основных явлений.

Результаты, полученные при помощи электронного микроскопа. Основные результаты, полученные до настоящего времени при помощи электронного микроскопа, сводятся к следующему.

В первые моменты прохождения электронного пучка микрокристаллы бромида серебра непрозрачны, затем через несколько десятков секунд в них появляются прозрачные участки, образование которых обусловлено миграцией ионов серебра. Исходный силуэт микрокристалла виден благодаря ограничивающей его темной кайме, а выделяющееся серебро собирается в агрегаты с закругленными контурами, локализованные главным образом вблизи поверхности; некоторые агрегаты даже образуют на поверхности выступы [1].

* Экспозицией мы называем произведение интенсивности электронов на время, т. е. экспозиция представляет количество электричества.

Некоторые авторы [2] пытались наблюдать менее измененные микрокристаллы, растворяя бромид серебра после короткой экспозиции тиосульфатом натрия. Таким методом удалось наблюдать частицы серебра, выделившиеся в микрокристаллах в начале видимого почернения, вызванного светом; эти частицы обычно обладали геометрическими формами кристаллического серебра.

Если микрокристаллы бромида серебра находились не на коллоидной пленке держателя образца, а были окружены желатиной фотографического слоя, то можно было наблюдать, что после облучения в течение некоторого времени каждый микрокристалл был окружен ореолом, состоящим из множества маленьких непрозрачных частичек. Повидимому, это явление связано с выделением брома в результате восстановления бромида серебра, причем желатина играет роль акцептора брома.

Микрокристаллы, проявленные химически после освещения, имеют волокнистую структуру. Эти нити образуются в ограниченном числе точек, повидимому, соответствующих агрегатам серебра, которые играют роль центров проявления.

Трийа [3] показал методом электронографии, что микрокристаллы бромида серебра обычно плохо образованы (несовершенная кристаллизация). Это является необходимым условием для появления свободного серебра. В случае совершенных кристаллов серебро не выделяется даже при самых продолжительных облучениях электронами. Кроме того, он показал, что серебро выделяется в сильно диспергированном кристаллическом состоянии. Так как электронный пучок имеет конечный диаметр, которым нельзя пренебречь, то дифракционное изображение охватывает довольно большое число микрокристаллов бромида серебра и поэтому невозможно определить, ориентировано ли выделяющееся серебро относительно исходного кристалла бромида серебра.

Особенности устройства электронного микроскопа. Прежде чем приступить к изложению результатов данного исследования, полезно указать некоторые особенности устройства электронного микроскопа, использованного в настоящей работе (рис. 1). В держатель образца были внесены усовершенствования, специально предназначенные для того, чтобы облегчить наблюдение быстро протекающих процессов.

Образец вводился через особый канал, к которому была присоединена трубка, содержащая высушивающее вещество. Общая продолжительность откачки, даже в присутствии влаги, никогда не превышала 10 сек. Это позволяло вводить образец без предварительного высушивания и наблюдать его уже через 15 сек. после введения, поскольку благодаря такой промежуточной откачке можно было не выключать пучка и не делать никаких переключений электронного пучка во время этих операций.

В результате изображение образца оставалось устойчивым с момента его установки на место.

С другой стороны, приспособление для введения и установки образца позволяло определять местонахождение какой-либо точки на образце с точностью порядка микрона.

Все эти усовершенствования позволили начинать наблюдение микрокристалла разбавленной фотографической эмульсии менее чем через 1 сек. после начала действия электронного пучка; затем после проявления всего препарата при помощи капли проявителя можно было снова наблюдать то же самое проявленное зерно.

Отметим также, что в тех случаях, когда нужно было избежать быстрого изменения наблюдаемого кристалла, плотность тока на образце была снижена до величины порядка 25 мкА/мм^2 . Напротив, когда было желательно изучить тепловые явления, пучок концентрировался путем специальной регулировки режима электронной пушки и при помощи конденсора, причем плотность тока достигала величины порядка 10 мА/мм^2 . Значения ускоряющего напряжения лежали в области между 80 и 96 кВ .

Обычные эмульсии. Эмульсионный слой фотографической пластинки растворяли в достаточно большом количестве теплой воды. Каплю этого раствора помещали на пленку коллодия, укрепленную на держателе образца, и рассматривали под микроскопом.

Микрокристаллы бромида серебра имели хорошо известный вид пластинок, обычно гексагональной формы, с диаметром порядка 1 μ . Так как их толщина колебалась от 0,1 до 0,2 μ , то они были совершенно непрозрачны. В начале облучения электронным пучком они имели резкие контуры, затем весьма быстро образовывались мелкие закругленные наросты и одновременно с этим почти прозрачный ореол диффузной зернистой структуры в желатине, окружающей кристалл (рис. 2). Плотность ореола была более значительной на внешних его частях, чем вблизи периферии микрокристалла. Если такой кристалл проявлялся метоловым проявителем, то восстановленное серебро имело вид довольно коротких нитей, весьма многочисленных и сильно перепутанных между собой. Их ширина достигала около 5 $\text{м}\mu$ (рис. 4 и 5).

Если вместо проявления продолжали электронную бомбардировку кристалла, то появлялись прозрачные полости, которые постепенно занимали весь объем кристалла, и вскоре последний становился совершенно пустым, а вблизи исходных контуров появлялись агрегаты серебра (рис. 3), т. е. наблюдались явления, описанные в другой работе [1].

Ореол, образованный бромом, исчезал, но его границы оставались обозначенными пунктирной линией, состоящей из весьма ма-

лых частиц ($70 \text{ \AA}$) большой плотности, разделенных довольно большими промежутками (в среднем $250 \text{ \AA}$). Вероятно, эти частицы образовались в результате конденсации паров серебра в маленькие капельки на поверхности желатины, которые оказались как бы «сметенными» диффундирующим бромом.

Действительно, кристалл не становится совершенно прозрачным, а сохраняет слабую непрозрачность, усиленную вдоль его границ. Трудно сказать, имели ли мы дело с тонким слоем осадка серебра или, наоборот, с тонкой пленкой бромида серебра; последняя могла образоваться в результате явления, аналогичного наблюдаемому на кристаллах хлорида натрия, которые под длительным воздействием интенсивного излучения полностью «опоражниваются», сохраняя лишь тонкий остов.

На этой стадии микрокристалл бромида серебра, как и следовало ожидать, уже не мог быть проявлен химически.

Изменения под действием электронов. Однако не все микрокристаллы бромида серебра одинаково изменялись под действием электронов. Так, например, некоторые сравнительно толстые кристаллы (от $0,3$ до $0,5 \text{ \mu}$) не проходили стадии образования поверхностных выпуклостей.

Автор провел серию опытов на весьма тонких кристаллах (порядка $0,09 \text{ \mu}$), полученных из поверхностного слоя эмульсии Илфорд Q1 при очень низких плотностях электронного тока, порядка 50 мка/мм^2 на образце.

В начале электронной бомбардировки по контуру кристалла появлялось множество маленьких «протуберанцев» высотой около $150 \text{ \AA}$ и шириной около $20 \text{ \AA}$. Вокруг кристалла образовывался бромный ореол, расположенный так же, как почти во всех остальных случаях. Он был отделен от кристалла более прозрачной зоной шириной около $0,2 \text{ \mu}$ (рис. 6). Затем плотность наружной зоны увеличивалась и достигала насыщения, но ее наружный диаметр почти не возрастал. Эта зона распространялась на расстояние около $0,5 \text{ \mu}$ от контуров кристалла. Одновременно в нескольких точках контура возникали более значительные выступы около $400 \text{ \AA}$ длиной и $150\text{--}200 \text{ \AA}$ шириной. В последней стадии некоторое число агрегатов серебра локализовалось в точках нахождения этих выступов по контурам кристалла. Они уже не обладали круглой формой, а обнаруживали отдельные углы с закругленными вершинами, однако не имели характерных контуров многоугольника.

Роль тепловых эффектов. Для выяснения роли тепловых эффектов в протекании описанных выше явлений автор провел опыты при повышенной плотности электронного тока, допустимой

для исследуемого образца. В таких условиях изменение кристалла протекало с большой скоростью: выступы, наблюдавшиеся в прошлом опыте, достигали $0,2 \mu$ длины, сохраняя прежнюю ширину около $150\text{--}200 \text{ \AA}$. Вскоре на концах выступов появлялись капельки серебра (рис. 7), которые быстро увеличивались в размере, достигая диаметра около $0,2 \mu$, затем кристалл опорожнялся одновременно с частичным испарением капелек серебра, диаметр которых уменьшался примерно до $0,1 \mu$; на этой стадии развитие останавливалось (рис. 8). Внутри кристалла также можно было обнаружить несколько капелек серебра.

Таким образом, можно предполагать, что сосредоточение основных масс серебра вне границ кристалла и круглая форма этих частиц серебра связаны с большими плотностями электронного тока и, вероятно, с тепловыми эффектами при таких плотностях. Бромного ореола вообще нельзя было наблюдать, и только в самом конце облучения появлялась зона маленьких непрозрачных точек, тем более рассеянная, чем выше была интенсивность пучка.

Сверхтонкие пластинчатые кристаллы бромида серебра. Внутренняя структура всех описанных выше кристаллов могла наблюдаться только при электронных экспозициях, соответствующих значительному видимому почернению. В связи с этим автор полагал, что для выявления деталей структуры на более ранних стадиях изменения кристаллов необходимо использовать еще более тонкие образцы, так чтобы они в некоторых местах были прозрачны для электронов. Так как бром и серебро являются тяжелыми элементами, то толщина бромистого серебра не должна была превышать небольшого числа ионных слоев, т. е. нескольких десятков ангстремов. С другой стороны, для четкого наблюдения путей миграции ионов (если такое наблюдение вообще возможно) необходимо, чтобы другие размеры микрокристаллов не были меньше $0,25\text{--}0,5 \mu$. Кристаллы липпмановской эмульсии были непригодны для этой цели, так как они слишком толсты и малы.

После многочисленных, но безуспешных попыток изготовить кристаллы, отвечавшие указанным требованиям, автор обнаружил, что они содержатся в среднем слое эмульсии Ильфорт Q1 старого типа. Для извлечения таких микрокристаллов был использован следующий метод. С поверхности пластинки стирали пыль кисточкой для бритья, быстро ополаскивали пластинку теплой водой для удаления поверхностного слоя эмульсии и погружали в кювету с водой при $35\text{--}40^\circ$ без покачивания. Пластинку извлекали еще до полного удаления слоя.

Полученные таким способом микрокристаллы имели весьма малую толщину порядка $10 \text{ \AA}$. Максимальный размер их достигал

величины порядка 1μ . Они имели почти правильную гексагональную форму, в то время как кристаллы поверхностного слоя имели большую толщину (около $100 \text{ \AA}$.) и весьма неправильную форму.

Вследствие исключительно малой толщины этих кристаллов электроны с ускоряющим напряжением $80\text{--}96 \text{ кВ}$ легко проходили через них; кроме того, фотохимическое действие электронов было значительно понижено вследствие уменьшения потерь энергии в кристалле. Съемка изображения производилась на пластинках с довольно крупными зернами, максимальная чувствительность которых точно соответствовала используемым напряжениям.

Приняв всевозможные меры предосторожности, чтобы рассматриваемый кристалл находился в электронном пучке весьма короткое время до съемки, автор получил снимок (рис. 9), изображающий два агрегата серебра в процессе их образования. Один из агрегатов в действительности состоит из двух весьма близко расположенных центров, которые слишком малы для того, чтобы можно было различить их форму, другой обладает хорошо заметной шестиугольной формой с ребрами, параллельными ребрам кристалла бромида серебра.

На этом снимке отчетливо видны пути миграции ионов, расположение которых весьма замечательно: они образуют прерывистые линии с отрезками, ориентированными главным образом по главным кристаллографическим осям. Вокруг микрокристалла виден ореол, созданный диффузией брома. Он имеет почти равномерную плотность повсюду, исключая область, прилегающую к кристаллу, который окружен весьма прозрачной узкой каймой. В некоторых точках по контуру кристалла видны довольно глубокие трещины. К сожалению, дальнейшие изменения этого кристалла не регистрировались.

Сверхтонкие кристаллы, не окруженные желатиной. Автор получал такие кристаллы, сметая их с эмульсии Q1 кисточкой. Их толщина была несколько больше, чем в прошлых опытах (вероятно, около $50\text{--}100 \text{ \AA}$.) Наблюдение этих кристаллов производилось до только что описанных опытов, когда автор еще не владел техникой, позволявшей наблюдать кристалл в первые моменты его изменения. После сравнительно малоинтенсивной электронной бомбардировки в течение некоторого времени в исследуемом препарате были найдены многочисленные кристаллы бромида серебра, совершенно прозрачные и содержавшие множество малых частиц серебра со средним диаметром $100 \text{ \AA}$.

Число этих частиц особенно велико по контурам исходного кристалла, который очерчен ими в виде пунктирной линии (рис. 10). Из наблюдений следует, что образование весьма большого числа малых агрегатов серебра связано с отсутствием

желатины. Наиболее крупные агрегаты диаметром около 750 Å имели ясно выраженную форму многоугольника. Так как разрешающая способность микроскопа не превосходила ≈ 30 Å, то углы казались слегка закругленными и поэтому отсутствие многоугольной формы у малых частиц серебра не является показательным.

Выделение серебра. Таким образом, можно заключить, что серебро всегда выделяется в кристаллическом состоянии. Однако имеющиеся данные еще не позволяют установить, ориентированы ли эти микрокристаллы беспорядочно или, наоборот, по определенным направлениям, зависящим от положения кристаллографических осей исходного кристалла бромида серебра. Автор заметил, что на некоторых снимках хорошо кристаллизованные частицы серебра обладали определенной ориентацией в одном преимущественном направлении.

Результаты опытов Трийа, который нашел беспорядочную ориентацию, можно объяснить тем, что в сравнительно толстых и плохо кристаллизованных кристаллах бромида серебра, с которыми он экспериментировал, процесс совершенной кристаллизации не распространялся на значительную глубину, в то время как в сверхтонких микрокристаллах, изученных автором, этот процесс, вероятно, распространялся по всей толщине. С другой стороны, как уже было указано, электронный пучок одновременно затрагивал большое число кристаллов.

Выводы. Эта работа показывает, что исследованные до сих пор микрокристаллы бромида серебра находились в такой стадии изменения, которая была весьма далека от стадии, отвечающей нормальным фотографическим явлениям, и что, с другой стороны, ход наблюдаемых процессов определяется главным образом влиянием интенсивной электронной бомбардировки.

Использование сверхтонких пластинчатых кристаллов бромида серебра позволило уменьшить поглощение электронов и тем самым добиться следующих результатов:

а) уменьшить энергию, поглощаемую кристаллом за время наблюдения, и, следовательно, уменьшить побочные эффекты и фотографическую чувствительность кристалла;

б) наблюдать изменение кристалла с начального момента облучения, поскольку кристаллы были сравнительно прозрачны.

Полученные снимки показали если не начало образования скрытого изображения, то по крайней мере начало видимого потемнения или, возможно, даже соляризации.

Остается дать теоретическую интерпретацию наблюдаемым фактам. Особого внимания заслуживают следующие наблюдения:

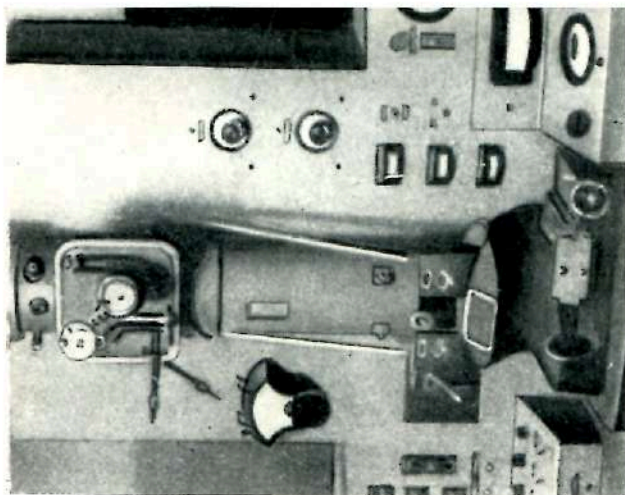


Рис. 1. Часть электронного микроскопа фирмы «Société optique et précision de Levallois» с приспособлением для ввода образца и его перемещения, осуществляемого при помощи двух жестких стержней, смонтированных на прецизионном кардане. Координаты образца распределяются по шкалам с ценой деления 0,5 μ , расположенным по обе стороны окуляра.

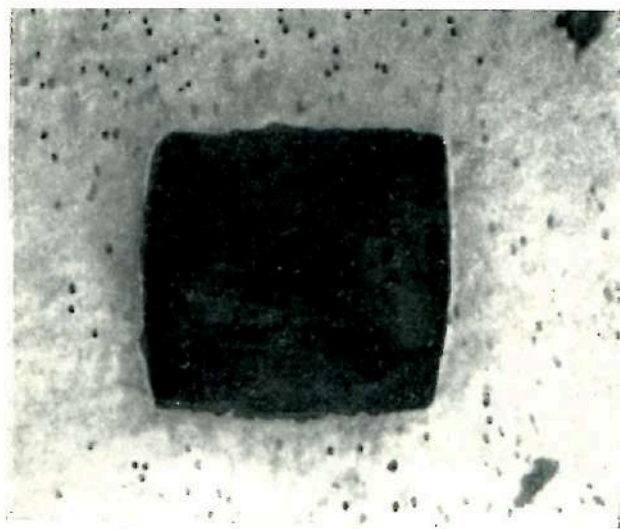


Рис. 2. Кристалл бромида серебра из той же эмульсии, что и кристалл на рис. 3. На контурах кристалла появились выпуклости, но наиболее кристалла преобладают на этой стадии (6400X).



Рис. 3. Кристалл бромида серебра из высокочувствительной негативной эмульсии после продолжительной бомбардировки электронным пучком.
Классический снимок: отчетливо видны очертания кристалла (46500X).



Рис. 4. Кристалл бромида серебра из высокочувствительной негативной эмульсии, освещенный светом и проявленный метоловым проявителем (15000 $\times$).

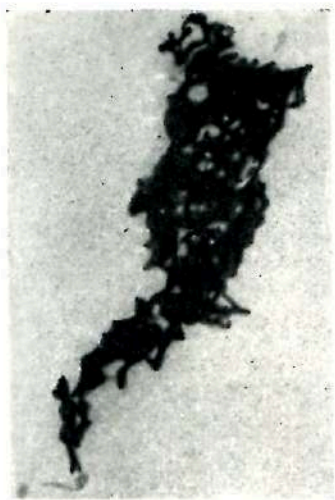


Рис. 5. Группа кристаллов бромида серебра из высокочувствительной негативной эмульсии, облученных пучком электронов и проявленных метоловым проявителем (17500 $\times$).



Рис. 6. Тонкий кристалл (100 Å) из эмульсии Ильфорд Q после кратковременного облучения электронами.

На контуре видны выступы. Интересно расположение бромного серебра (15000 $\times$).



Рис. 7. Кристалл бромида серебра из эмульсии Ильфорд Q после интенсивной бомбардировки электронами.

Интересно образование шариков серебра вне границ кристалла (20000 $\times$).

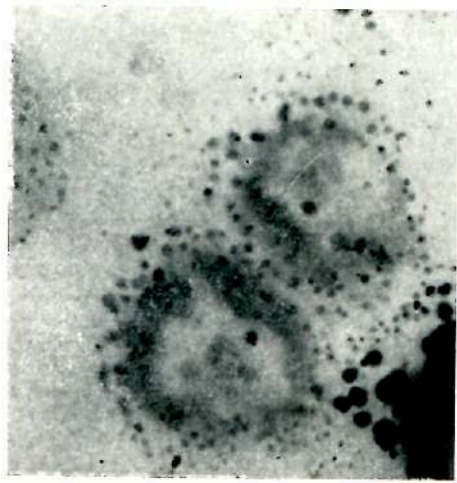


Рис. 8. Кристаллы бромида серебра из эмульсии Ильфорд Q после интенсивной и продолжительной электронной бомбардировки.

Кристаллы пусты и содержат несколько шариков серебра, большей частью вне границ кристалла (23500X).

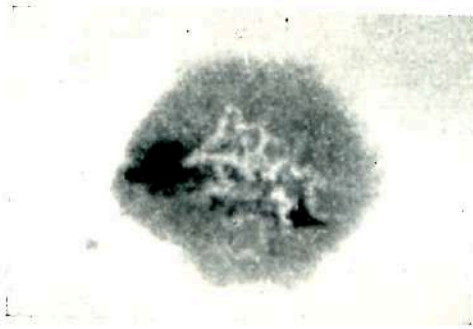


Рис. 9. Кристалл бромида серебра из эмульсии Ильфорд Q, подвергнутый одновременно кратковременной электронной бомбардировке.

Видны два агрегата серебра в процессе их облучения. Один из агрегатов состоит из двух ресма бланков пистров. Хорошо видны пути миграции ионов (26500X).

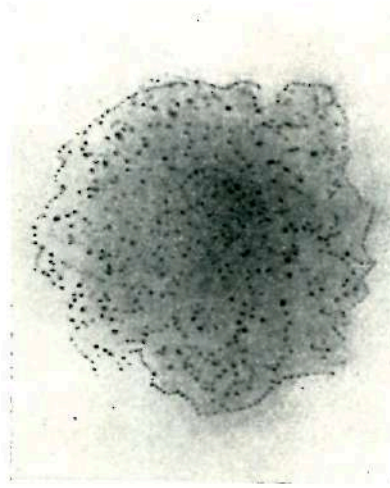


Рис. 10. Кристалл бромида серебра из эмульсии Ильфорд Q, не окруженный жемчужиной.

Интересно отметить большое количество и повсеместную локализацию малых частиц серебра после продолжительной бомбардировки электронным пучком малой интенсивности (59000X).

1. Ореол, образующийся в результате диффузии брома в желатину, всегда отделен от кристалла более прозрачной зоной шириной около $0,2 \mu$ даже в начале ее образования.

2. Плотность этого ореола, содержащего бром, возрастает по мере изменения кристалла, но его наружный диаметр увеличивается незначительно. Кроме того, после того как достигнуто насыщение, процесс изменения кристалла замедляется.

3. Ширина различных зон ореола мало меняется с размерами кристалла.

4. Внутренняя зона обычно содержит значительно более прозрачную часть шириной около $100 \text{ \AA}$, примыкающую к кристаллу.

5. Некоторые из полученных снимков, повидимому, не согласуются с современными теориями скрытого изображения, в которых принимается, что миграция ионов серебра происходит через посредство дефектов кристаллической решетки [4]. Чтобы кристаллы становились столь прозрачными, как это наблюдалось в опытах автора, необходимо, чтобы трещины, которые образуются в кристалле, проходили почти через всю его толщину. Расположение трещин на полученных автором снимках кристаллов показывает, что последние обладают мозаичной структурой, которая играет основную роль в образовании центров проявления.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. von Ardenne, Z. angew. Photogr., 2, 14 (1940).
2. Hall C. E., Schoen A. L., J. Opt. Soc. Am., 31, 281 (1941).
3. Trillat J. J., Mériçoux R., J. phys. radium, 7, 497 (1936).
4. Генри Р., Мотт Н., Успехи химии, 7, 1755 (1938); Митчелл Дж. Химия фотографических процессов, сб., Издательство, 1951, стр. 167.

5.

Ж. Трийа

ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПОЛИКРИСТАЛЛЫ И МОНОКРИСТАЛЛЫ БРОМИДА СЕРЕБРА

J. J. Trillat, Sci. ind. fotogr., 23, No 4, 129—136 (1952).

§ 1. Введение

Известно, что при прохождении пучка моноэнергетических электронов через достаточно тонкую пленку кристаллического вещества (порядка нескольких миллимикрон) электроны подвергаются дифракции. С другой стороны, электроны оказывают

сильное химическое воздействие на фотографическую эмульсию, быстро создавая в ней скрытое изображение и даже соляризацию.

Опыты автора показали, что если пропускать узкий пучок моноэнергетических электронов через весьма тонкую пленку галогенида (например, бромида) серебра и если химическое восстановительное действие электронов сопровождается выделением серебра в кристаллической форме, то изображение последнего можно наблюдать на флуоресцирующем экране и получить ряд снимков по мере его образования при облучении. Иначе говоря, этот метод заключается в одновременном использовании химических (восстановление) и волновых (диффракция) свойств моноэнергетических пучков электронов, которые отражаются от продуктов, возникающих в результате воздействия этих самых электронных пучков.

При помощи того же самого метода дифракции электронов можно исследовать изменения, происходящие в пленке или кристалле бромида серебра, облученных видимым или ультрафиолетовым светом в течение различного времени.

Этим методом автор за период с 1935 г. провел ряд исследований чистого бромида, бромосеребряной желатиновой эмульсии и структуры слоев органических сенситизаторов (цианинов), адсорбированных на галогенидах [1—3].

Важнейшие результаты этих исследований могут быть сформулированы следующим образом:

Пленки бромида серебра, полученные прямым бромированием пленок чистого серебра [1]. Пленки исходного серебра (сплюснутая серебряная фольга) обладали ясно выраженной текстурой, направленной вдоль оси [100], перпендикулярной к поверхности пленки. После превращения в бромид действием бромной воды и исследования при помощи пучка электронов с ускоряющим напряжением от 45 до 55 кВ эти пленки дали лишь диффузную картину, которая через некоторое время (от нескольких секунд до нескольких минут) превращалась в дифракционную картину кристалла. Полученные электронограммы показали, что мы имели дело с монокристаллами бромистого серебра, обычно беспорядочно ориентированными, но иногда обладающими слабо выраженной ориентацией с плоскостью (111), параллельной поверхности пленки.

Наконец, и это наиболее существенно, нельзя было обнаружить никаких интерференций, которые можно было бы приписать кристаллам серебра. Это верно даже для тех точек препаратов, которые облучались электронами в течение максимального времени (иногда более 2 час.).

В случае нодида серебра дифракционная картина, характерная для этого вещества (кубическая и гексагональная решетки), появлялась немедленно или почти немедленно; в остальном результаты были те же, что для бромида серебра.

Напротив, в результате фотографического проявления эти пленки немедленно превращались в микрокристаллическое неориентированное серебро (дифракционные кольца), не обнаруживавшее никаких признаков сильно ориентированной структуры исходной пленки серебра.

Пленки бромида серебра, полученные испарением раствора бромида серебра на подкладке из ацетилцеллюлозы [1]. В этом случае можно было немедленно наблюдать дифракционную картину бромида серебра, часто указывавшую на ориентацию кристаллов с плоскостью (111) (плоскость октаэдра), параллельной поверхности пленки. В результате продолжительной бомбардировки электронами одного и того же участка на электронограмме не появлялось никаких следов кристаллического серебра.

Пленки эмульсии бромида серебра + желатина [2]. Из желатиновой бромосеребряной эмульсии с весьма мелкими микрокристаллами можно было приготовить исключительно тонкие пленки (50 мк). На электронограммах таких пленок обычно наблюдалось одно гало, обусловленное желатиной, а через несколько секунд электронной бомбардировки появлялись дифракционные кольца, обусловленные микрокристаллическим неориентированным серебром, соответствующим стадии соляризации. На отдельных более редких участках немедленно появлялась картина, характерная для бромида серебра, но тогда нельзя было обнаружить никаких местных следов серебра даже после продолжительного облучения. В результате проявления металлическое серебро появлялось во всех точках пленки.

Появление кристаллического серебра под действием электронов было приписано автором большему или меньшему несовершенству кристаллической структуры галогенида серебра. Серебро должно выделяться тем легче, чем менее совершенна структура бромида (внутренние напряжения, нарушения структуры). При производстве фотографических эмульсий образуются именно такие несовершенные кристаллы.

Автор предпринял также новые исследования, во-первых, для проверки предыдущих результатов на бромосеребряных пленках, приготовленных в точно известных условиях, и, во-вторых, для выяснения возможного влияния ориентации кристаллов галогенида на образование и ориентацию серебра. Известно, что этот вопрос связан с проблемой образования скрытого изображения и поэтому представляет большой интерес.

§ 2. Общие экспериментальные методы

Был использован метод прохождения, который дает значительно более точные результаты, чем метод отражения. Все исследованные автором тонкие пленки бромида серебра (толщиной

от 50 до 60 $\mu\text{м}$) были приготовлены путем напыления в вакууме кристаллов бромида серебра, синтезированных в присутствии избытка бромида калия.

Галогенид легко испаряется в вакууме при нагревании, и его пары были конденсированы либо на слой глицерина, либо на весьма тонкую пленку парлодиона, либо на грань (100) свежеосажденного кристалла каменной соли при 20°. В последнем случае после конденсации кристаллы хлорида натрия растворяли в дистиллированной воде. Пленку бромида серебра, имевшую желтоватый цвет, промывали 3—4 раза в бидистилляте до полного удаления следов хлорида натрия, приставшего к пленке, и помещали на тонкую никелевую сетку, подобную той, какая применяется в электронной микроскопии. Для защиты пленки бромида серебра от света не принималось никаких специальных мер.

Электроннографическое исследование производилось либо на электронографе, описанном в одной из прошлых работ [4], либо на электронографе Трюб-Таубера: первый прибор позволял получать весьма интенсивный пучок электронов (диаметр пучка 0,1 мм); второй прибор благодаря фокусирующему устройству давал повышенную разрешающую способность и электронограммы большой чистоты (пучок был диаметром от 0,01 до 0,1 мм в зависимости от фокусировки).

Во всех случаях ускоряющее напряжение составляло от 75 до 55 кв . Препараты можно было перемещать и исследовать в каждой точке в нормальном и наклонном пучке электронов, а также подвергать местной электронной бомбардировке в течение многих минут и даже нескольких часов. Препараты были весьма прочны и ломались очень редко.

А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ГАЛОГЕНИДА СЕРЕБРА

Пленки готовились конденсацией паров бромида серебра на тонкой парлодионной пленке или на стеклянной пластинке, покрытой слоем глицерина, который далее растворяли в воде.

Начальная диффракционная картина. На электронограмме таких пленок наблюдались весьма тонкие диффракционные кольца (рис. 1), характерные для кристаллического бромида серебра и позволявшие производить точную идентификацию структуры.

Ребро элементарной ячейки, определенное электронографически, оказалось равным 5,768 Å, что полностью совпадало с данными рентгеноструктурного анализа.

Приведенная электронограмма бромида серебра характерна для микрокристаллической структуры без какой-либо преимущественной ориентации; толщина колец позволила установить, что

средний размер зерна был менее 1μ , что было подтверждено рассмотрением по методу фазоконтрастной микроскопии (рис. 2, $950\times$) *.

Следует заметить, что, как и в прошлых опытах автора (бромид серебра, полученный прямым бромированием серебра [1]), на пленках, полученных напылением бромида серебра в вакууме, также не всегда можно было сразу наблюдать диффракционную картину галогенида. Обычно вначале наблюдалась простая диффузная картина, без каких-либо диффракционных явлений; через несколько секунд после начала рассмотрения и под местным воздействием электронной бомбардировки на флуоресцирующем экране начинали появляться диффракционные кольца. Резкость и интенсивность этих колец возрастала по мере ослабления диффузного рассеяния; именно в этот момент были получены фотографии вроде тех, что изображены на рис. 1. Лишь в редких случаях наблюдалось немедленное появление диффракционной картины бромида серебра. Повидимому, это зависит от толщины пленки галогенида серебра, ибо сравнительно более толстые пленки требовали более продолжительной бомбардировки для появления диффракции от кристаллов, чем тонкие.

Длительное действие электронов. Интересно было увеличить продолжительность электронной бомбардировки не только до нескольких секунд, но и до нескольких минут или даже до нескольких часов.

Во всех случаях прохождение пучка электронов через один и тот же участок препарата сопровождалось изменением диффракционной картины на флуоресцирующем экране. Через некоторое время, которое изменялось от нескольких секунд до нескольких минут, появлялись слабые дополнительные кольца, интенсивность которых быстро увеличивалась до максимума. Диффракционные кольца бромида серебра постепенно ослаблялись, однако не исчезали окончательно, как бы указывая на установление равновесия.

Эти новые кольца были обусловлены микрокристаллическим серебром, образовавшимся путем прямого восстановления бромида серебра под действием электронной бомбардировки. Исследование распределения интенсивностей показало, что эти микрокристаллы имели совершенно случайное расположение.

Рис. 3, состоящий из трех различных снимков, дает ясное представление о явлениях, которые непрерывно сменяли друг друга

* Размеры зерен бромида серебра зависели главным образом от расстояния между нагревателем и напыляемой поверхностью в эвакуированном сосуде. При расстоянии 10 см зерна были слишком малы для различения в микроскоп при увеличении 1000. При расстоянии 6 см размер зерен достигал 1μ (рис. 2).

на экране. Вначале препарат дал электронограмму чистого бромида серебра (сектор *A*), которая через несколько минут превратилась в электронограмму смеси бромида и металлического серебра (сектор *B*). В дальнейшем облучение не вызвало никакого заметного изменения в относительных интенсивностях колец этих двух веществ, но привело к общему ослаблению электронограммы, которая становилась все более и более размытой и наконец полностью исчезла. Сектор *C* представляет электронограмму серебра, полученного химическим восстановлением бромида серебра (см. ниже). Она позволяет легко отмечать кольца серебра, появившиеся на электронограмме галогенида.

Невозможно дать точной интерпретации этого ограниченного превращения $\text{AgBr} \rightarrow \text{Ag}$. Скорость образования поликристаллического металлического серебра, повидимому, существенно зависит, с одной стороны, от интенсивности электронного пучка и, с другой, от толщины, размеров и совершенства структуры кристаллов, образующих исследуемую пленку. При постоянной интенсивности электронного пучка серебро появляется через разное время в различных препаратах и даже в различных участках одного и того же препарата.

Тем не менее можно сказать, что обычно именно в случае наиболее тонких пленок наблюдается почти моментальное появление дифракционных колец бромида серебра и что эти пленки быстрее всего восстанавливаются до металлического серебра, пока в конце концов не останется лишь незначительного количества бромида.

Другое наблюдение было сделано при полном просмотре пленки бромида серебра. Если после местного облучения определенного участка препарата и появления на нем серебра, видимого на флуоресцирующем экране, сместить препарат на весьма короткое расстояние в сторону, то всякие следы колец серебра исчезают и появляются лишь после нового облучения препарата. Иначе говоря, образование серебра под действием электронов полностью локализовано на участке облучения. Следовательно, его нельзя приписать действию рентгеновских лучей, возникающих в бромиде серебра при электронной бомбардировке.

Наконец, если после окончания опытов рассмотреть пленку бромида серебра, то можно заметить, что участок, подвергавшийся электронной бомбардировке, окрашен в синеватый цвет и имеет размеры поперечного сечения электронного пучка. Если перемещать препарат во время облучения, то электронный пучок прочертит на нем тонкий штрих синего цвета, который, несомненно, обусловлен присутствием восстановленного серебра.

В заключение укажем, что неориентированные пленки бромистого серебра, полученные конденсацией в вакууме, способны постепенно превращаться в также неориентированное металлическое серебро. Такое явление никогда не наблюдалось в прежних опы-

тах [1], в которых бромид приготавливался испарением раствора или химической обработкой серебряной фольги. Более поздние работы [5] подтверждают наблюдения автора.

Проявление пленок бромида серебра. Как было уже показано автором [1, 2], весьма тонкий препарат галогенида серебра может быть проявлен путем простого помещения его на поверхность разбавленного проявляющего раствора. Препарат моментально чернеет, становится нерастворимым в гипосульфите и может быть снова исследован электронографически.

Применив такую методику к исследованию неориентированных пленок бромида серебра, полученных напылением в вакууме, автор нашел, что все участки препарата давали дифракционную картину металлического серебра (рис. 3, сектор С). Распределение интенсивностей указывало на беспорядочную ориентацию мелких кристалликов. После действия проявителя нельзя было обнаружить никаких следов бромида серебра. Результаты не менялись, если пленка проявлялась до или после облучения электронами. Следовательно, простого освещения пленки видимым светом было достаточно для ее полного проявления, и структура восстановленного серебра не зависела от того, подвергалась ли пленка электронной бомбардировке или нет.

Рис. 4 позволяет точно сравнить электронограммы бромида серебра и серебра, восстановленного проявителем из бромида серебра. На рис. 5 изображена электронная микрофотография ($25\,000\times$) того же препарата.

Влияние подкладки. В предыдущих опытах пары бромида серебра конденсировались на весьма тонкой пленке коллодия или парлодиона, т. е. на аморфных и прозрачных подкладках. Если бромид серебра конденсировался на поверхности глицерина, то после промывания в воде такую пленку можно было легко поместить на весьма тонкую металлическую сетку, подобную сеткам, используемым в электронной микроскопии. В этом случае исследуемый препарат соприкасался с подкладкой только в местах нахождения проволочек сетки, которые не пропускали электронов.

Результаты исследования таких препаратов, находившихся на сетках, ничем не отличались от результатов для препаратов на подложках из коллодия или парлодиона, которые, следовательно, не играют никакой роли в наблюдаемых явлениях.

Были исследованы также свойства бромида серебра, полученного конденсацией паров на тонкой желатиновой пленке. Известно, что чистый бромид серебра обладает малой светочувствительностью и что желатина играет важную роль в фотографической эмульсии. Теория сенсibilизирующего действия желатины была разработана Шеппардом с сотрудниками [6]. Автор также

исследовал такое действие желатины в случае весьма тонкой и мелкодисперсной фотографической эмульсии, подвергнутой электронной бомбардировке и изученной электронографически [2] (см. «Введение», п. 3).

Пары бромид серебра конденсировались на тонкой желатиновой пленке, служившей подкладкой. Для получения такой пленки тонкую металлическую сетку погружали в разбавленный раствор желатины, который после высыхания давал сплошную перепонку, пронизываемую для электронов. Электронограмма такой перепонки была характерна для аморфных веществ и не менялась при электронной бомбардировке.

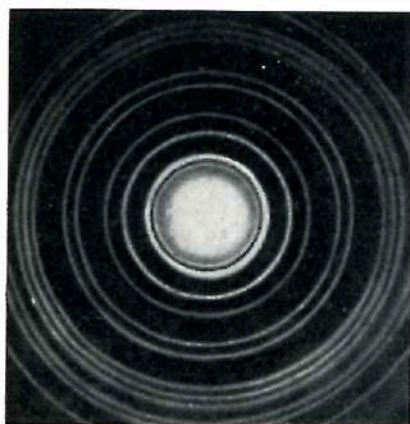
Осадок бромид серебра на желатиновой подложке получали напылением в вакууме по методике, принятой для всех других подкладок. Можно было также приготовить пленку бромид на глицерине и после промывки перенести ее на 1%-ный раствор желатины. Многочисленные препараты были исследованы электронографически в тех же условиях, как препараты, описанные выше.

Результаты, полученные на этих новых объектах, существенно не отличались от предыдущих. Лишь в отдельных случаях образование металлического серебра под действием электронов происходило с большей скоростью и в больших количествах, чем в предыдущих опытах. Между тем можно было ожидать ускорения образования серебра, поскольку желатина является акцептором брома; возможно, что это действие желатины было незначительно, так как микрокристаллы галогенида находились только на поверхности желатины, а не были распределены по ее объему в тесном контакте с ней. Автор надеется в ближайшее время проверить эту гипотезу на новых опытах. В настоящий момент нельзя еще сделать определенных выводов.

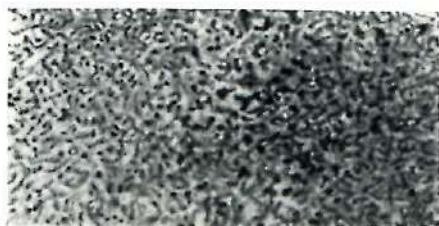
Б. ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК БРОМИДА СЕРЕБРА

Интересно было повторить описанные выше опыты на пленках монокристаллического бромид. Такие пленки получались конденсацией паров бромид серебра в вакууме на грань (100) кристалла хлорида натрия (см. выше раздел «Общие экспериментальные методы»); далее каменную соль растворяли в воде и пленку бромид помещали на тонкую медную или никелевую сетку.

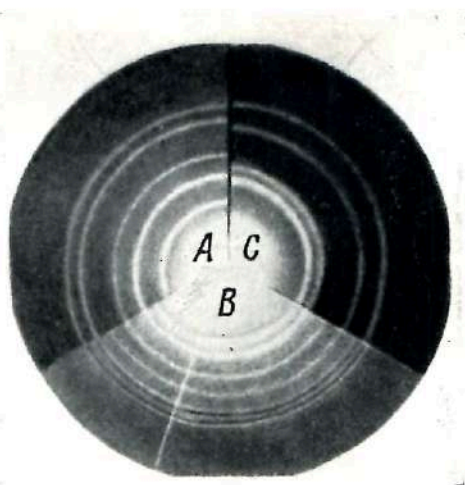
Хлорид натрия и бромид серебра обладают весьма близкими кристаллическими решетками (NaCl — гранецентрированная кубическая решетка, ребро куба элементарной ячейки $a = 5,6287 \text{ \AA}$; AgBr — гранецентрированная кубическая решетка, $a = 5,768 \text{ \AA}$). В таких условиях поверхностная решетка грани (100) хлорида натрия вызывала высокоориентированную кристаллизацию паров



Р и с. 1. Электронсграмма поликристаллического бромида серебра.



Р и с. 2. Поликристаллический бромид серебра. Микрофотография по фазо-контрастному методу (950 $\times$).



Р и с. 3. Выделение серебра в поликристаллической пленке бромида серебра.

A — исходное AgBr ; *B* — $\text{AgBr} + \text{Ag}$; *C* — Ag .

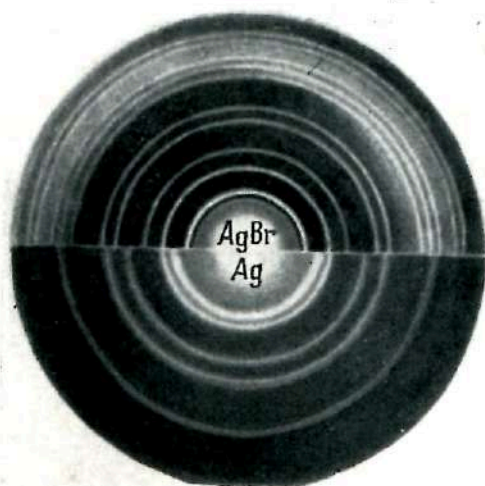
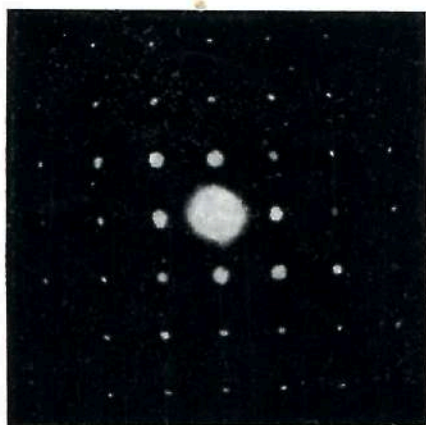


Рис. 4. Вверху: электронограмма поликристаллического бромида серебра; внизу: электронограмма поликристаллического серебра.



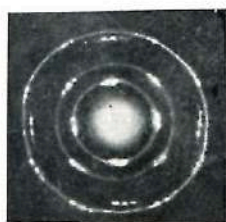
Рис. 5. Серебро, восстановленное проявлением; электрономикрофотография (25000 $\times$).



Р и с. 6. Электронограмма монокристаллического бромида серебра.



Р и с. 7. Монокристаллический бромид серебра; микрофотография по фазоконтрастному методу (950X).



Р и с. 8. Электронограмма бромида серебра, содержащего несколько ориентированных кристаллов.

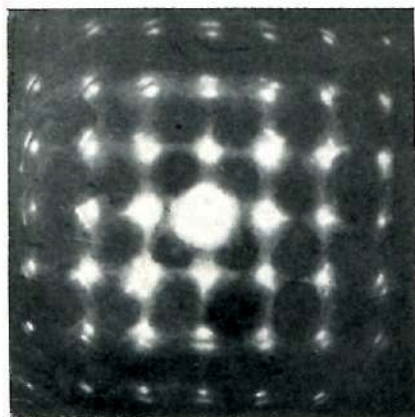


Рис. 9. Электронограмма монокристаллического бромида серебра: деформации и «кометы».

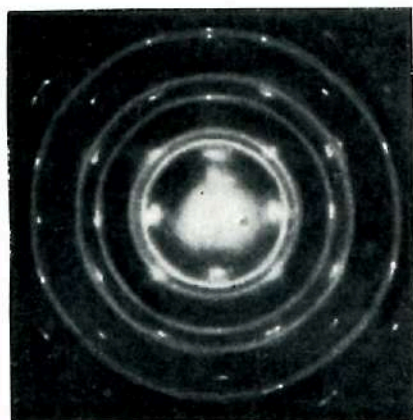


Рис. 10. Выделение серебра в монокристаллической пленке бромида серебра; пятна обусловлены AgBr, кольца — Ag.

бромид серебра, и образующаяся пленка состояла из кристаллов бромида, ориентированных таким образом, что их плоскости (100) были параллельны плоскостям (100) хлорида натрия. Такая пленка давала диффракционную картину монокристалла и иногда имела большую поверхность (10—15 мм²) и толщину от 20 до 50 мк.

На рис. 6 изображена электронограмма, полученная при перпендикулярном падении электронного пучка на плоскость пленки, т. е. параллельно направлению [001] кристалла бромида серебра. Эта электронограмма представляет плоскость обратной решетки, соответствующую плоскости (001) бромида серебра, и диффракционные пятна, расположенные в вершинах квадрата, легко могут быть индентифицированы.

Начальная диффракционная картина. Яркая диффракционная картина монокристалла бромида серебра (рис. 6) появлялась на экране либо мгновенно для весьма тонких препаратов, либо несколько медленнее для участков большей толщины; в последнем случае сначала появлялось несколько диффракционных пятен, затем другие, и интенсивность изображения достигала максимума через несколько секунд. Это явление напоминало вид города со взаимно перпендикулярными улицами в момент зажигания фонарей. Такие же явления автор наблюдал на пленках серы [7].

Так же как и в случае поликристаллических пленок, причину этого явления следовало искать в толщине изучаемого препарата. Сравнительно толстые пленки испытывали местное нагревание в результате прохождения электронов, часть которых рассеивалась по всем направлениям. Это приводило к местным уменьшениям толщины препарата до тех пор, пока он не становился достаточно тонким для получения хороших интерференций. Так как толщина пленки, пронизываемая электронами, становилась весьма незначительной, то поглощение вследствие рассеяния уменьшалось и пленка становилась устойчивой в этом состоянии; ее диффракционная картина соответствовала тогда двумерной решетке вследствие расширения отражения нулевого порядка, вызванного уменьшением толщины.

Рис. 6 представляет диффракционную картину, соответствующую совершенному монокристаллу бромида серебра. Однако в действительности мы имеем дело с мозаикой мелких кристаллов, тесно соприкасающихся друг с другом и ориентированных строго в одинаковом направлении. На рис. 7 изображена микрофотография той же пленки, полученная по фазоконтрастному методу.

Детальное изучение пленок позволило обнаружить некоторые интересные особенности. Так, например, иногда можно было

заметить, что некоторые участки пленки состояли из смеси ориентированных и неориентированных кристаллов; в этом случае электронограмма состояла из дифракционных пятен, накладывавшихся на дифракционные кольца. Иногда дифракционные пятна были сдвоенными и строеными, что указывало на присутствие двух или трех монокристаллов, претерпевших поворот на несколько градусов вокруг направления [001] (рис. 8).

Препараты не всегда бывали строго плоскими и обнаруживали местные складки и изгибы. В связи с этим появлялись новые удлиненные дифракционные пятна, соответствовавшие тем плоскостям решетки бромида серебра, наклоненным к оси [001], для которых выполнялись условия интерференции.

Весьма характерным в этом отношении является рис. 9. На нем отчетливо выражена волокнистая структура, для которой все дифракционные пятна оказываются в точности локализованными на дифракционных кольцах бромида серебра. Эти местные деформации могли существовать в пленке уже до съемки, но они могли также возникать в результате нагревания пленки электронным пучком.

На некоторых электронограммах наблюдались радиальные полски («кометы»), исходящие из наиболее интенсивных дифракционных пятен; подобные полосы видны на рис. 9. Понятно, что в этом случае мы имеем дело не с нарушением монохроматизации электронов. Автор полагает, что это представляло чисто электростатическое явление, обусловленное зарядами, возникавшими в фотографической пленке в точках попадания электронного пучка. За время исследования центральное пятно приобретало значительный заряд; интенсивные дифракционные пятна тоже получали заметные заряды. Эти локализованные отрицательные заряды отталкивались от центрального пятна в радиальных направлениях, и электроны выбрасывались из окружающих пятен по тем же направлениям. Этим объясняется происхождение радиальных полос («комет»), заметных только на электронограммах с особенно интенсивными пятнами.

Наконец, и это одно из наиболее важных наблюдений, на многих препаратах из монокристаллов бромида серебра наблюдалось появление металлического серебра даже в первые моменты облучения. Рис. 10 демонстрирует дифракционную картину такого типа. Почти во всех случаях серебро выделялось в виде неориентированных микрокристаллов (дифракционные кольца), которые легко можно было отличить от монокристаллов бромида. Иногда даже наблюдалось только изображение колец серебра, без каких-либо следов бромида. Невозможно было установить, содержалось ли серебро в препарате еще до облучения или же оно появлялось мгновенно в начале облучения электронами.

Опыты на подкладках из желатины не дали никаких новых результатов.

Длительное действие электронов. При местном воздействии электронов в течение нескольких минут наблюдались явления, которые в общем напоминали картину для поликристаллических пленок бромида серебра и характеризовались главным образом появлением беспорядочно ориентированных микрокристаллов серебра. Однако в некоторых случаях, особенно в начале облучения, можно было констатировать слабую ориентацию серебра с направлением $[001]$, перпендикулярным к поверхности пленки.

Серебро, освобожденное электронами, появлялось более или менее быстро в зависимости от исследуемого участка; однако невозможно было предвидеть, мог ли данный участок быть чувствительнее другого. Автор наблюдал, что в некоторых случаях серебро образовывалось в первые секунды облучения, а интенсивность дифракционного изображения бромида серебра сначала падала и вскоре стабилизировалась. Также и в данном случае возможность образования серебра, повидимому, определялась местными условиями, и образование протекало с большей скоростью в несовершенных кристаллах. Так, в точках, дававших электронограмму совершенного монокристалла, серебро не появлялось даже после длительного облучения.

Влияние ориентации облучаемой плоскости на образование серебра. Интересно было выяснить, приводит ли изменение ориентации кристаллов бромида серебра к увеличению скорости выделения серебра. К сожалению, автору не удалось получить кристаллы с плоскостями (110) или (111) , параллельными плоскости препарата. Можно было воспользоваться косвенным методом, меняя угол падения электронного пучка таким образом, чтобы последовательно выявлять различные плоскости обратной решетки, соответствующие тем или иным плоскостям кристалла; подобный метод исследования металлических монокристаллов был уже описан [8].

Так, если плоскость (211) была расположена перпендикулярно к электронному пучку, то через несколько минут облучения можно было констатировать рекристаллизацию и дезориентацию бромида серебра; одновременно с этим появлялись слабые кольца серебра. Но в конечном счете не наблюдалось никаких новых явлений во время этих весьма трудных опытов.

Действие проявителя на монокристаллические пленки бромида серебра. В результате проявления монокристаллических пленок бромида серебра по описанной выше методике получались пленки

восстановленного серебра, совершенно нерастворимого в тиосульфате натрия. Электронографическое исследование их указало на то, что весь препарат состоит из поликристаллического и совершенно неориентированного серебра (см. рис. 3, 4). Структура химически восстановленного серебра не зависела от того, исходили ли из монокристалла или же из поликристаллического слоя бромида серебра.

§ 3. Выводы

Прежде всего следует сделать одно существенное замечание. Различные участки, исследованные методом диффракции электронов, имели довольно значительную площадь, соответствовавшую сечению электронного пучка в месте его пересечения с препаратом. В зависимости от фокусировки диаметр пучка менялся от 0,1 до 0,01 мм. Следовательно, в тех случаях, когда кристаллы были весьма малы (порядка микрона или меньше), в отражении принимало участие большое их число, и если они были неориентированы, то на экране были видны полные диффракционные кольца. Наоборот, если все кристаллы были ориентированы параллельно и имели строго одинаковое расположение, или же если их размеры превосходили размеры электронного пучка, то исследуемый участок давал диффракционную картину монокристалла, плоского или слегка изогнутого, смотря по обстоятельствам.

Первый случай имел место для неориентированных поликристаллических препаратов бромида серебра, второй — для препаратов, полученных на хлориде натрия и обладавших совершенной ориентацией. Эти результаты полезно сравнить с результатами, полученными при помощи электронного микроскопа *. Известно, что при электронной бомбардировке микрокристаллов бромистого серебра наблюдается быстрое появление прозрачных участков, вызванное миграцией ионов серебра. Серебро собирается в агрегаты с закругленными контурами, локализованными вблизи поверхности. В случае весьма тонких зерен бромида электронная бомбардировка приводит даже к удалению вещества, причем присутствие большего числа мелких агрегатов серебра связано с отсутствием желатины. Опыты автора по диффракции электронов показали, что эти агрегаты имеют кристаллическую структуру и что их ориентация не связана с ориентацией кристалла бромида серебра.

Довольно редкие участки, на которых наблюдалось моментальное появление только одного серебра, отвечают внутренним или

* См. статью 4, стр. 66.

наружным агрегатам, образовавшимся во время полного восстановления зерен бромида; возможно, что они содержат также плохо образованные кристаллы бромида серебра, которые не обнаруживаются на электронограмме.

На участках, для которых наблюдалась диффракционная картина, состоящая из диффракционных пятен бромида серебра, наложенных на кольца серебра (см. рис. 10), одновременно сосуществуют монокристалл бромида (или кристаллы бромида, ориентированные в строго одинаковом направлении) и зерна поликристаллического серебра; бромид еще не полностью превратился в серебро, и из него образуются поликристаллические агрегаты серебра на поверхности и даже в глубине кристалла. Так как это серебро могло образоваться только из бромида, то следует принять, что последний восстанавливается, не теряя ни своей структуры, ни ориентации. На это указывают, повидимому, некоторые снимки, полученные при помощи электронного микроскопа *. Эти процессы могут быть точно прослежены только на монокристаллах.

В связи с этим уместно вспомнить недавние опыты [9], которые показали, что в монокристалле бромида серебра, облученном ультрафиолетовыми лучами в течение нескольких минут, сначала появляются следы ориентированного серебра, а затем, с удлинением облучения, — зерна серебра, лишенные определенной ориентации. Кроме того, в этой работе было показано, что ориентация серебра на поверхности и внутри кристалла различна.

Однако в этой работе, повидимому, недостаточно глубоко рассмотрено сильное влияние электронов на освобождение серебра. Необходимо предпринять новые исследования процессов, протекающих при весьма коротких облучениях видимым светом или электронами, а также рассмотреть влияние совершенства кристаллической решетки бромида серебра (деформации, вызванные внутренними напряжениями, дефекты дислокации и т. д.).

Наконец, известно, что поведение желатиновых фотографических эмульсий сильно отличается от поведения чистого бромида серебра. Сельм * показал, что при электронной бомбардировке весьма тонких кристаллов на краях последних образуются многочисленные нити серебра до $0,2 \mu$ длиной, которые превращаются в агрегаты. Эти наблюдения хорошо согласуются с опытами автора [2]. В ближайшем будущем автор предполагает улучшить технику настоящей работы и использовать электронный микроскоп наряду с электронографом.

* См. статью 4, стр. 66.

ЛИТЕРАТУРА

1. Trillat J. J., Motz H., J. phys. radium, **7**, 89 (1936).
2. Trillat J. J., Mériçoux R., J. phys. radium, **7**, 497 (1936).
3. Trillat J. J., Mériçoux R., Compt. rend., **21**, 160 (1941).
4. Trillat J. J., Motz H., Ann. de physique, **4**, 281 (1935).
5. Pashley D. W., Acta crystall., **3**, 163 (1950); Photogr. Sensitiv. Lond., 1951, p. 39.
6. Sheppard S. E., J. Motion Picture Engrs., **24**, 500 (1935); Sheppard S. E., Trivelli A. P., Loveland R. P., Sci. Ind. protogr., **5**, 29, 43 (1925), Sheppard S. E., Bericht VIII Intern. Kongress Photogr., Dresden, 1931, p. 13.
7. Trillat J. J., Oketani S., Z. Kristall., **A98**, 334 (1937).
8. Trillat J. J., J. phys. radium, **10**, 465 (1939).
9. Berry C. R., Griffith R. L., Acta crystall., **3**, 219 (1950).

II. ФОТОСЛОИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

6

Е. Додд и К. Уоллер

ВЛИЯНИЕ РАЗБАВЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ ТИПА G5 ЖЕЛАТИНОЙ

E. C. Dodd, C. Waller, *Fundamental Mechanisms of Photographic Sensitivity*, London, Butterworths, 1951, pp. 266—271 *

После того как были получены первые фотографические эмульсии, специально предназначенные для регистрации ядерных следов, отношение количества галоидного серебра к желатине было установлено на таком максимально высоком уровне, который мог быть совместим с приемлемыми практическими условиями получения и полива эмульсии. Это отношение серебра к желатине обычно сохранялось и в эмульсиях более позднего изготовления с целью применения данных по калибровке эмульсии одного типа ко всем другим типам. Принятая концентрация 1 моль галогенида серебра в 30 г желатины позволяла получать высокую плотность зерен в следах частиц, недостижимую в обычных эмульсиях, а также обычно желательную высокую тормозную способность.

Учитывая фактический состав эмульсии, т. е. другие ее необходимые компоненты, можно вычислить, что почти точно половина всего объема стандартных эмульсий Иلفорд занята галогенидом серебра. Можно думать, что дальнейшее увеличение его концентрации едва ли дало бы какие-либо положительные результаты. Однако нельзя утверждать, что всякое другое изменение эмульсии обязательно будет бесполезным. Несмотря на то, что Жданов [1], Демерс [2] и Уэбб [3] показали, что в данной эмульсии плотность зерен в следе прямо пропорциональна концентрации галогенида серебра, последняя не является существенным фактором, определяющим качество эмульсии. Легкость об-

* В дальнейших ссылках на этот источник будет применяться сокращенное обозначение «Photogr. Sensitiv.» — *Прим. ред.*

наружения и наблюдения следов зависит как от плотности зерен в следах, так и от плотности зерен вуали, которые проявляются без облучения.

Добавление желатины к эмульсии привело бы к уменьшению плотности зерен в следах (числа зерен на единице длины следа), если бы она не влияла на чувствительность эмульсионных микрокристаллов или на их проявление. Это уменьшение должно быть пропорционально уменьшению коэффициента C :

$$C = \frac{V_{AgBr}}{V_{AgBr} + V_G + V_P},$$

где члены в знаменателе обозначают объемы, занимаемые галогенидом серебра, желатиной и, соответственно, водорастворимыми составляющими.

Плотность вуали (число зерен в единице объема сухой обработанной эмульсии) пропорциональна

$$V_{AgBr}/V_G,$$

т. е. она будет падать с разбавлением скорее, чем плотность зерен в следах. Коэффициент усадки определяется выражением

$$KY = (V_{AgBr} + V_G + V_P)/V_G.$$

Это есть отношение объемов сухой эмульсии до и после обработки, которое является практически важным фактором.

Кроме того, легко показать, что в случае некоторых эмульсий слишком плотная упаковка эмульсионных микрокристаллов может вызвать вуалирование вследствие неэффективного проявления. Значение этого эффекта для ядерных эмульсий неизвестно.

Целью настоящей работы является исследование влияния разбавления эмульсии G5 желатиной, а также выяснение того, компенсируется ли ожидаемая потеря плотности зерен в следах уменьшением вуали и может ли эта потеря быть восстановлена при помощи усиленного проявления. Мы не будем рассматривать в этой статье более крупной проблемы улучшения качества ядерных эмульсий за счет повышения гибкости эмульсионной технологии, которая станет возможной при повышенном содержании желатины.

§ 1. Экспериментальная часть

К отдельным порциям одной и той же партии эмульсии добавляли столько желатины, чтобы ее отношение к галогениду серебра было в 1, 2, 4, 6 и 8 раз больше нормального. Полученные порции эмульсии поливали на стекло в таком количестве, чтобы толщина сухого слоя равнялась 100 μ , и высушивали обычным способом. В табл. 1 приведены характеристики полученных эмульсий.

Таблица 1

Характеристики эмульсий

Эмульсия	Содержание желатин	C (стр. 88)	V_{AgBr}/V_G	Коэффициент усадки	Плотность, г/см ³
I	Нормальное . . .	0,495	1,14	2,30	3,92
II	Двухкратное . . .	0,355	0,59	1,67	3,16
III	Четырехкратное . .	0,225	0,301	1,34	2,47
IV	Шестикратное . . .	0,165	0,202	1,23	2,15
V	Восьмикратное . .	0,130	0,152	1,17	1,96

Облучение. Для облучения пластинки хранили в вертикальном положении в течение 3—4 недель.

Проявление. Пластинку погружали на 20 мин. в воду при 18°. Далее пластинку проявляли нужное время при 18° в проявителе ID-19, разбавленном 10 объемами воды. Проявочную кювету энергично покачивали при помощи механического приспособления.

Состав проявителя ID-19: метол 4,5 г; сульфит натрия (крист.) 288 г; гидрохинон 17,5 г; карбонат натрия (крист.) 260 г; бромид калия 8 г; вода до 2 л.

Наблюдения. *Плотность зерен в следах.* Пластинки рассматривались при помощи иммерсионного объектива (2 мм) и окуляров (6×) в бинокулярном микроскопе. В поле зрения шириной 145 μ подсчитывались прямолинейные следы релятивистских частиц, лежащие параллельно или почти параллельно стеклянной подложке. Приведенные результаты являются средними из 30 измерений для каждой пластинки. Авторы не встретились с какими-либо затруднениями, связанными с необходимостью избегать при счете следов те из них, которые созданы более сильно ионизирующими частицами. Результаты счета для каждой пластинки лишь слабо отклонялись от средней величины.

Плотность зерен вуали. Техника счета зерен вуали была разработана Дилворсом [4]; пластинки рассматривались под монокулярным микроскопом с 2-миллиметровым объективом апохроматом и окуляром 15× при интенсивном освещении зеленым светом. В фокальной плоскости окуляра находилась диафрагма, уменьшающая диаметр поля зрения до 32,5 μ . Для каждого определения объектив фокусировали на плоскость, лежащую на 10 μ ниже поверхности эмульсии, и сосчитывали все зерна, лежавшие в фокусе, на 24 полях зрения для каждой пластинки. Так как для счета зерен следов и вуали использовали те же самые пластинки, то при счете зерен вуали трудно было избежать счета

Таблица 2

Плотность зерен в следах и плотность зерен вуали

Время проявления, мин.	Эмульсия									
	I		II		III		IV		V	
	n^a	f^b	n	f	n	f	n	f	n	f
15	17,0	23	16,6	27,5	—	—	—	—	—	—
25	25,7	53,5	23,1	16,5	—	—	—	—	—	—
40	27,0	66	24,7	42	13,4	31,5	—	—	—	—
50	—	—	—	—	14,2	31,5	—	—	—	—
60	30,4	101	29,6	71	15,3	35,5	—	21,5	—	19
80	36,4	148,5	31,6	92	19,3	66	—	47,5	—	44,5
120	35,8	189	33,2	129	21,0	88	13,2	83,5	10,2	49
160	—	—	—	—	21,2	87,5	—	—	—	—
200	—	—	—	—	21,5	122	—	—	—	—

^a n —среднее число зерен на 100 μ следа релятивистской частицы.
^b f —среднее число зерен вуали в фокусе на 10 000 μ^2 .

зерен, принадлежащих следам. Поэтому возможно, что результаты счета зерен в наиболее разбавленных эмульсиях несколько завышены. Можно определенно утверждать, что точность счета зерен вуали уступает точности счета зерен в следах.

В табл. 2 приведены результаты для пяти эмульсий при различных временах проявления.

Можно видеть, что для каждой из наиболее разбавленных эмульсий, IV и V, было произведено только одно определение плотности зерен в следе при проявлении в течение 120 мин. При более коротких временах проявления зерна были разделены столь большими промежутками, что подсчет был

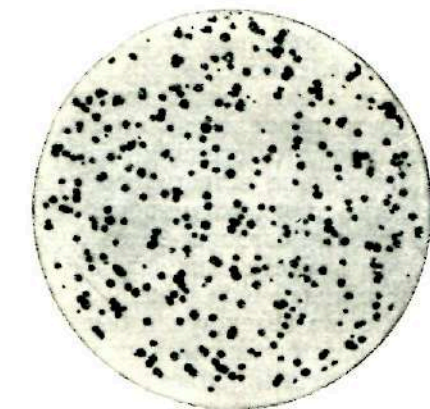


Рис. 1. Микрофотография исходной эмульсии G5 (2500 $\times$).

невозможен, а при более продолжительном проявлении следы маскировались вуалью.

В некоторых опытах пластинки облучали нейтронами и наблюдали следы протонов. В концентрированных эмульсиях следы

были слишком плотны для счета зерен, но в эмульсии V средняя плотность зерен вблизи конца пробега составляла 60 зерен на 100μ .

На рис. 1 изображена микрофотография ($2500\times$) исходной эмульсии, использованной для опытов. Обычная микрофотография не позволяла произвести точную оценку размеров столь малых кристаллов, но измерения на увеличенном отпечатке дали для среднего диаметра эмульсионного микрокристалла величину

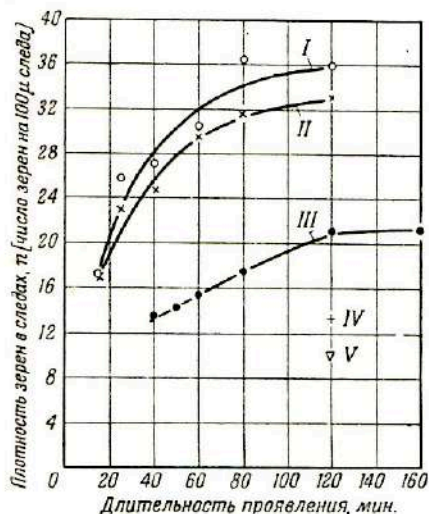


Рис. 2. Зависимость между плотностью зерен в следах и длительностью проявления.

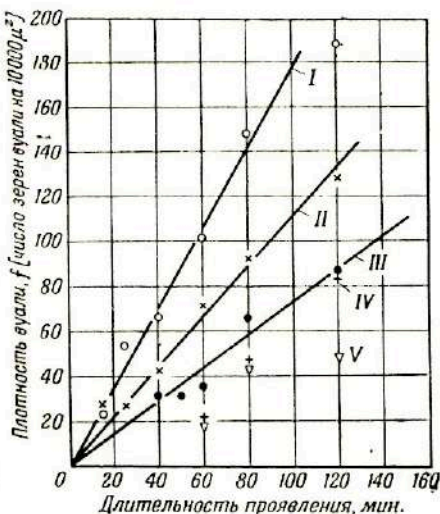


Рис. 3. Зависимость между плотностью зерен в вуали и длительностью проявления.

$0,27 \mu$. Такой же результат был получен путем счета микрокристаллов на пластинках, содержавших известное малое количество галогенида серебра (при предположении, что микрокристаллы имеют сферическую форму).

На рис. 2 изображена зависимость плотности зерен (число зерен на 100μ) в следах релятивистских частиц от длительности проявления. При постоянной длительности проявления плотность зерен увеличивалась с концентрацией эмульсии, причем особенно большое различие наблюдалось между эмульсиями II и III. Тем не менее следы были вполне четко различимы как в более концентрированных эмульсиях при коротких временах проявления, так и в разбавленной эмульсии III. В эмульсиях IV и V трудно было наблюдать релятивистские следы вследствие низкой плотности зерен и пониженного коэффициента усадки (т. е. увеличенного наклона следов к плоскости эмульсии).

На рис. 3 показана зависимость плотности зерен вуали от длительности проявления. Зависимость близка к линейной, хотя у двух наиболее разбавленных эмульсий точки разбросаны слишком сильно, чтобы их можно было связать какой-либо определенной функцией. Это обусловлено главным образом включением зерен, затронутых частицами, как это указывалось выше. Четко выражено уменьшение концентрации зерен вуали в единице объема с увеличением разбавления эмульсии, однако можно показать, что это уменьшение не столь значительно, как можно было

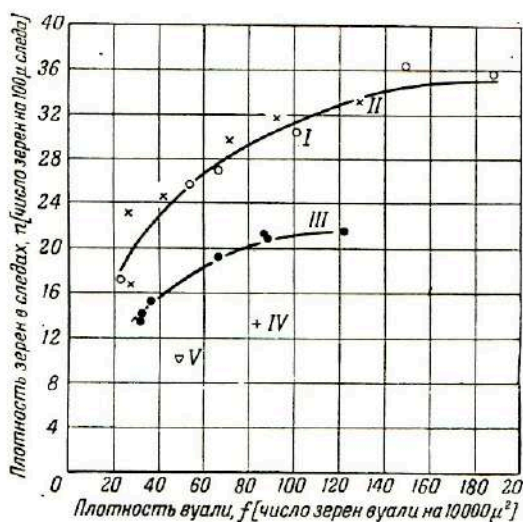


Рис. 4. Зависимость между плотностью зерен в следах и плотностью зерен вуали.

ожидать из прямой пропорциональности отношению количества галогенида серебра к конечному объему обработанной эмульсии. Этот факт интересен, так как он показывает, что в данной ядерной эмульсии вуалирование, обусловленное близостью соседних микрокристаллов, не представляет серьезной опасности.

Авторы полагают, что рис. 4 достаточно хорошо иллюстрирует сравнительные качества эмульсий в отношении их способности к четкой регистрации следов релятивистских частиц. На этом рисунке представлена зависимость плотности зерен в следах от плотности зерен вуали. Изображенные кривые показывают, что между нормальной эмульсией I и разбавленной вдвое эмульсией II нет существенной разницы.

Если путем надлежащего выбора времени проявления получить равные плотности вуали для эмульсий I и II, то в пределах точности эксперимента плотности зерен в следах тоже будут оди-

наковы. Эмульсии с большим разбавлением уже не способны давать плотные следы, и если желателен низкий уровень вуали, то его лучше достигать неполным проявлением более концентрированных эмульсий, чем пользоваться эмульсиями с повышенным отношением желатина/серебро.

Интересно, однако, отметить, что следы частиц минимальной ионизирующей способности наблюдались в эмульсии, которая по содержанию желатины весьма близка к эмульсии, идущей на изготовление полутонковых тонкослойных пластинок Илфорд. Эти пластинки раньше широко использовались для регистрации следов сильно ионизирующих частиц.

§ 2. Обсуждение результатов

Тот факт, что 28%-ное уменьшение концентрации галогенида серебра (от $0,495$ до $0,355 \text{ см}^3$ на 1 см^3 эмульсии) не вызывает ухудшения качества эмульсии, может быть обусловлен тем обстоятельством, что соответствующее уменьшение исходного содержания галогенида серебра на единицу объема обработанной эмульсии еще более значительно (48%). Кроме указанной причины, имеется еще и другая, которую можно обнаружить, применяя формулу Жданова к исследуемым эмульсиям. На рис. 5 плотность зерен в следах для 120-минутного проявления дана как функция S (доли объема эмульсии, занимаемой галогенидом серебра). Полученная кривая близка к прямой, как этого и следовало ожидать при условии постоянства чувствительности отдельных микрокристаллов во всей серии эмульсий (при разных разбавлениях). Однако при высокой концентрации галогенида серебра (в исходной эмульсии G5) наблюдается значительное отклонение, и плотность зерен ниже теоретической.

Таким образом, при одинаковых условиях проявления микрокристаллы стандартной эмульсии G5 обладают значительно меньшей чувствительностью, чем микрокристаллы эмульсии с удвоенным отношением желатина/серебро. Безусловно, что доступ проявителя к микрокристаллам облегчается при увеличении содер-

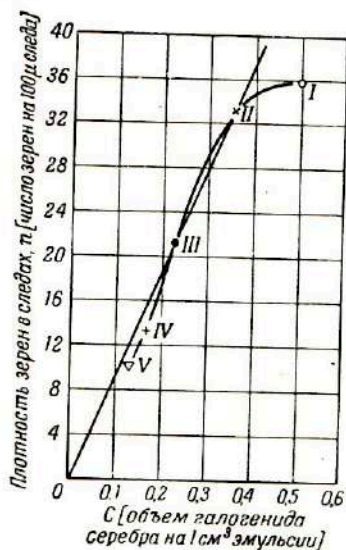


Рис. 5. Зависимость между плотностью зерен в следах и концентрацией галогенида серебра в эмульсии.

жания желатины. Однако этот фактор не может быть определяющим, поскольку для получения равной чувствительности микрокристаллов требуется слишком значительное уменьшение степени проявления, и плотность вуали (приведенная к равным количествам галогенида серебра) в этом случае значительно понижается.

Согласно Демерсу и Уэббу, формула Жданова, связывающая плотность зерен в следах весьма сильно ионизирующих частиц с концентрацией, имеет вид

$$n = 3lC/2d.$$

Подставляя $C = 0,130$ для эмульсии V, $l = 100 \mu$ и $d = 0,27 \mu$, получаем $n = 72$. Весьма близкое совпадение с наблюдаемой плотностью зерен в следах протонов ($n = 60$), конечно, случайно. Однако интересно будет ввести член P (по Демерсу, P есть вероятность проявления микрокристалла, задетого частицей) в данные, полученные для релятивистских частиц в исследованных пяти эмульсиях:

$$n = (3lC/2d) P.$$

Результаты этого приведены в табл. 3.

Таблица 3

Плотность зерен в следах сильно ионизирующих частиц и вероятность проявления

Эмульсия	$\frac{3lC}{2d}$	$P = 2dn/3lC$			
		Длительность проявления, мин.			
		40	60	80	120
I	275	0,095	0,11	0,13	0,13
II	197	0,125	0,15	0,16	0,17
III	125	0,11	0,12	0,15	0,17
IV	92	—	—	—	0,17
V	72	—	—	—	0,14

Из этой таблицы ясно видны повышенная чувствительность разбавленных эмульсий и необходимость значительного уменьшения времени проявления для получения равных чувствительностей. Можно думать, учитывая плотность зерен в следах протонов, что эти цифры представляют приблизительную долю эмульсионных микрокристаллов, которые становятся проявляемыми при прохождении частицы с минимальной ионизирующей способностью.

В настоящее время авторы не могут объяснить наблюдаемое изменение чувствительности при разбавлении эмульсии. Так как были исследованы только следы, параллельные плоскости стекляннной подложки, то возможно, что плотность зерен в этих следах зависит от ориентации микрокристаллов и что сама ориентация (если принять, что микрокристаллы не имеют сферической формы) изменяется при весьма высокой концентрации. Кроме того, возможно, что при весьма плотной упаковке эмульсионных микрокристаллов наблюдается хорошо известный для обычных фотоматериалов эффект десенсибилизации давлением.

§ 3. Выводы

Чувствительность эмульсии к релятивистским частицам не уменьшается при небольшом увеличении содержания желатины, если проявление доводится до получения равных значений плотности зерен вуали. Чувствительность индивидуальных эмульсионных микрокристаллов заметно повышается при разбавлении эмульсии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданов А., J. phys. radium, **6**, 233 (1935).
2. Demers P., Фотографический метод в ядерной физике, сб., Издательство, 1952.
3. Webb J. N., УФН, **38**, 77 (1949).
4. Dilworth C. C., частное сообщение.

7

Л. Иенни

ПРИГОТОВЛЕНИЕ И СЕНСИБИЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОНЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ПЛАСТИНОК

L. Jenny, Photogr. Sensitiv., pp. 259—264.

В 1948 г. Хельгом и автором статьи [1] был опубликован метод приготовления фотографической эмульсии, пригодной для регистрации ионизирующих частиц. Эта эмульсия была изготовлена на основе рецептуры, предложенной Демерсом [2], но ее чувствительность была недостаточно высока: следы α -частиц полония, например, представляли собой цепочку изолированных зерен, а не сплошную линию. Средняя плотность зерен в таких следах составляла 1,6 зерен на 1 μ . Появление первых высокочувствительных пластинок Кодак NT, регистрирующих электроны, побудило исследовать возможность улучшения эмульсий соб-

ственного изготовления и особенно изыскать способы сенсibilизации пластинок к электронам.

Работа, проведенная в этом направлении за последние два года, может быть разделена на две части. Во-первых, была сделана попытка повысить чувствительность путем видоизменения метода изготовления эмульсии. В конце концов был разработан такой способ эмульсификации, который позволял простыми лабораторными средствами получить сравнительно однородные по размерам эмульсионные микрокристаллы, обладающие высокой чувствительностью. Во второй части работы были сделаны попытки найти вещества, которые вызывали бы дальнейшее повышение чувствительности к заряженным частицам, особенно к электронам.

§ 1. Рецепт эмульсии

В результате обширной экспериментальной работы, которая в настоящей статье не описана, была разработана следующая рецептура эмульсии.

Приготавливают три исходных раствора.

<i>Раствор 1:</i>	Дистиллированная вода	60 мл
	Желатина № 3202 (Винтертур)	3,6 г
	6-нитробензимидазол 1:500	1 мл
<i>Раствор 2:</i>	Дистиллированная вода	23 мл
	Бромид калия	14,8 г
	Иодид калия	0,6 г
	Бромид кадмия (водный), 10%-ный раствор	7 мл
<i>Раствор 3:</i>	Дистиллированная вода	30 мл
	Нитрат серебра	20 г

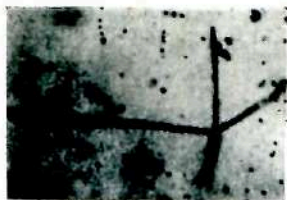
Раствор 1 приготавливали в стакане емкостью 250 мл, растворы 2 и 3 — в конических колбах емкостью 50 мл. Все вещества были высокой чистоты.

Через час после приготовления растворов, когда желатина достаточно набухла, стакан помещали в водяную баню, в которой при помощи термостата поддерживалась температура 37°. Желатина полностью переводилась в раствор при помощи механической фарфоровой мешалки. Исползованная желатина была исследована Амман-Брасом по новой методике [3], причем было обнаружено, что желатина содержала значительное количество химических сенсibilизаторов и довольно большое количество замедлителей (*Hemmungskörper*). Были испытаны также и другие сорта желатины Винтертур, однако они давали более мелкое зерно и пониженную чувствительность.

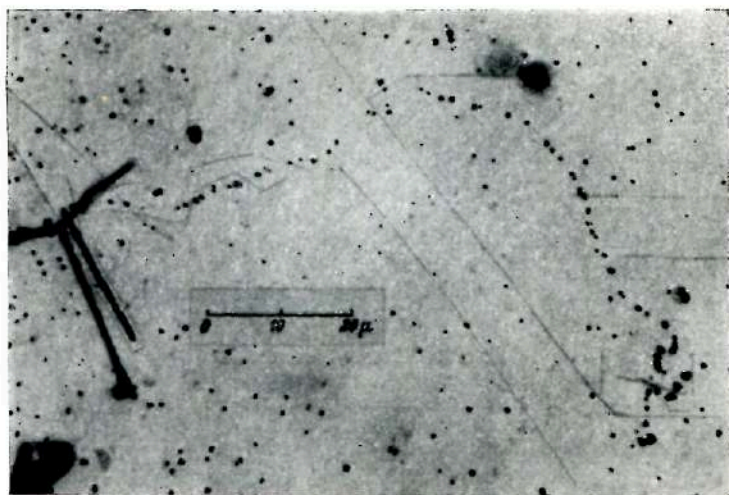
Растворы серебра и бромида переливали в стеклянные бюретки. Обе бюретки укрепляли над стаканом. Во избежание вспенивания регулировалась скорость перемешивания. Белый свет в



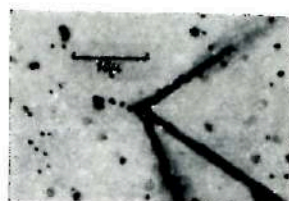
Р и с. 1. Следы α -частиц, зарегистрированные эмульсией, созревшей в отсутствие аммиака. Увеличение 695.



Р и с. 2. Следы α -частиц, зарегистрированные эмульсией, созревшей в присутствии аммиака. Увеличение 695.



Р и с. 3. Мозанка из четырех микрофотографий ториевой звезды с длинным электронным следом в новой эмульсии. Длина следа около 250 μ . Увеличение 950.



Р и с. 4. Короткий след электрона, зарегистрированный в первой электро-
ночувствительной эмуль-
сии.

темной лаборатории выключали и заменяли красным светом; кран бюретки, содержащей раствор бромида, открывали настолько, чтобы раствор поступал отдельными каплями. После добавления трех капель раствора бромида открывали кран другой бюретки. Оба раствора следовало приливать с одинаковой скоростью, сначала 2 капли в 1 сек., а по мере понижения уровней растворов в бюретках скорость могла быть уменьшена до 1 капли в 3 сек. Необходимо было следить за тем, чтобы бромид всегда находился в небольшом, но постоянном избытке. Резкое изменение скорости приливания бромиды вызывало осаждение бромиды серебра и образование плотной вуали. По мере увеличения объема эмульсии в стакане увеличивали также скорость перемешивания. Полное время приливания растворов составляло 30 мин. Небольшое изменение времени смешения (эмульсификации) не оказывало заметного влияния на свойства эмульсии. На этой стадии изготовления эмульсии обладала весьма низкой чувствительностью, но присутствие ионов кадмия и нитробензимидазола приводило к получению весьма однородных (по размерам) микрокристаллов. Чувствительность и размеры микрокристаллов увеличивались добавлением к перемешиваемой эмульсии через 32 мин. после окончания эмульсификации точно 6 мл концентрированного аммиака (уд. вес 0,91). Через 5 мин. аммиак нейтрализовали добавлением 4,5 г лимонной кислоты. Действием аммиака на бромид серебра достигалось сравнительно равномерное увеличение размера микрокристаллов и особенно повышение чувствительности. Испытания на сенситометре Эдер-Гехта показали, что обработка аммиаком вызывала трехкратное повышение чувствительности. Различия между α -следами, зарегистрированными обработанной и необработанной эмульсиями, демонстрируется рис. 1 и 2. Для улучшения механических свойств конечной эмульсии к ней через 38 мин. добавляли 1 г той же желатины и еще через 12 мин. эмульсию выливали в фарфоровые бачки, окруженные льдом. После застудивания эмульсии в прочный гель бачки помещали на 7 час. в холодильник.

После этого эмульсию нарезали на мелкие куски и промывали в течение 15 час. водопроводной водой, которая должна была быть по возможности холодной. Столь продолжительная промывка была необходима для удаления всех ионов аммония, присутствие которых определяли реактивом Несслера. После окончания промывки куски эмульсии оставляли на 1 час для стекания жидкости, переносили в стакан емкостью 250 мл и расплавляли в водяной бане, поддерживаемой при 28°.

К жидкой эмульсии объемом около 200 мл добавляли сначала 2 мл 2%-ного раствора хромовых квасцов, затем 6 мл водного (1:2) раствора глицерина и 5 мл спиртового раствора (0,04%-ного) сенсibilизатора. Наиболее эффективный из

ванием Ux_1 , Co^{60} и Th . На рис. 3 (см. после стр. 96) изображен след в пластинке, пропитанной весьма разбавленным раствором нитрата тория, быстро высушенной и хранившейся 5 дней до измерения.

Пластинки, приготовленные без сенсibilизатора, пригодны для некоторых других ядернофизических исследований, хотя они совершенно неспособны к регистрации электронных следов. Такие пластинки могут быть дополнительно сенсibilизированы погружением их на 2—10 мин., в зависимости от толщины, в раствор, состоящий из 2 мл 0,04%-ного раствора сенсibilизатора и 98 мл дистиллированной воды. Однако такой метод непригоден для сенсibilизации весьма толстослойных пластинок.

Концентрация галондного серебра в эмульсии составляла 83,8—84%, средний диаметр проявленного зерна — около 0,5 μ . При фиксировании в нейтральном фиксаже коэффициент усадки был равен 2,5, для дубящего фиксажа F5 он был равен 3,0. Зависимость пробег — энергия была весьма близка к этой зависимости для пластинок Ильфорт.

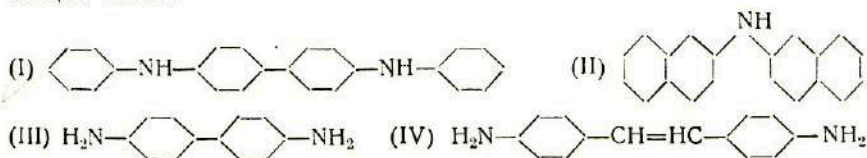
§ 2. Химическая сенсibilизация

Одновременно с проведением настоящей работы были исследованы различные методы химической сенсibilизации. В определенных условиях удалось получить высокочувствительные эмульсии посредством добавления малых количеств избыточного нитрата серебра или тиосульфата натрия. Следы α -частиц были весьма плотны, но сильный фон мешал идентификации электронных следов. Обычные антиувалирующие вещества не могли быть испытаны, так как автор не располагал ими. В 1938 г. было описано антиувалирующее действие дифениламина и трифениламина. Первые опыты с дифениламином, проведенные на пластинках старого типа, дали весьма интересные результаты: вуаль значительно уменьшалась, а плотность зерен в следах частиц увеличивалась; так, например, плотность зерен в следах α -частиц лония увеличилась от 1,6 до 2,2 зерен на 1 μ при постоянных условиях проявления. Этот результат послужил исходной точкой для всей дальнейшей работы. Далее были исследованы соединения, близкие по своей химической структуре к дифениламину, а именно 4,4'-динитродифениламин и 4-нитро-2'-аминодифениламин. Испытания этих двух соединений были проведены ранее на эмульсии, весьма близкой к окончательному рецепту. Первое соединение дало отрицательный результат, однако второе позволило впервые зарегистрировать следы электронов в нашей эмульсии (рис. 4). Эти следы были весьма коротки и никогда не состояли более чем из 12 зерен. Дальнейшие опыты с дифениламином в эмульсии того же типа показали, что следы содержат не

более 8 зерен. Плохой результат для нитропроизводного по сравнению с сенсibiliзирующим действием двух других соединений позволил заключить, что группы NO_2 оказывают отрицательное действие, а группы NH_2 способствуют сенсibiliзации. Дальнейшие опыты с другими соединениями, содержащими различное число групп NO_2 , подтвердили этот вывод.

Затем оказалось, что сенсibiliзирующее действие обуславливает группа $\text{R}-\text{NH}-\text{R}$. В связи с этим исследовали другие соединения такого типа. Ниже перечислены наиболее важные результаты.

В первой серии опытов были испытаны соединения следующих общих типов:



Все эти вещества оказывают различное сенсibiliзирующее влияние. Наиболее сильным сенсibiliзатором из этого ряда является соединение (I), позволяющее регистрировать следы с числом зерен до 17. Некоторые вещества из этого ряда обнаруживали флуоресценцию, но опыты ясно показали, что между флуоресценцией и сенсibiliзирующей способностью не существует никакой связи. Некоторые из испытанных сенсibiliзаторов были весьма сходны с фотографическими проявителями; одно из них, 1-амино-2-оксинафтен-4-сульфокислота, близко к эйконогену и является проявителем.

Все соединения, содержащие группы NH_2 или OH , оказывали сенсibiliзирующее действие, позволяя регистрировать короткие электронные следы, но проявляющее вещество 1-амино-2-оксинафтен-4-сульфокислота вызывало только образование вуали. Сходство между этими сенсibiliзаторами и органическими проявляющими веществами, с одной стороны, и вуалирующее действие проявителя аминоксинафтена — с другой, показывают, что сенсibiliзирующее действие может быть связано со стандартным окислительно-восстановительным потенциалом. Автор определил этот потенциал как меру давления электронов восстановителя. В одной из прошлых работ [6] автор установил существование критического значения стандартного потенциала, которое качественно характеризует проявляющие свойства восстановителя: проявляющей способностью обладают только те восстановители, стандартный потенциал которых ниже 800 мв. Потенциалы всех обычных проявляющих веществ, например метола, гидрохинона, *p*-фенилендиамина и т. п., лежат в области между 800 и примерно 700 мв. Если потенциал превышал 800 мв, то соединение не

обладало проявляющей способностью; если потенциал был значительно ниже 700 мв , то фотографическое (избирательное) проявление могло происходить только в среде с низким рН, в противном случае восстановительная способность была столь велика, что восстанавливалось все галогидное серебро без различия между облученными и необлученными участками эмульсионного слоя.

Согласно теории фотографического проявления, восстановление галогидного серебра вызывается переходом электронов от иона проявляющего вещества на галогидное серебро. Следовательно, для такого перехода необходима определенная величина потенциала. Согласно Физеру, стандартный потенциал дифениламина равен $1,076\text{ мв}$, а аминоксинафтена — 691 мв [7]. Следовательно, первое соединение с потенциалом выше критического не может передавать электроны галогидному серебру, а второе соединение обладает этой способностью. Для перехода электронов от дифениламина или другого соединения с потенциалом выше 800 мв на галогидное серебро необходимо, чтобы органическая молекула или ее часть была возбуждена до освобождения электронов, которые могут далее переходить на галогидное серебро и захватываться центрами чувствительности с образованием обычного скрытого изображения.

Для проверки этого предположения мы вводили в эмульсию разные соединения с потенциалами выше 800 мв и сравнивали их свойства со свойствами обычных проявляющих веществ типа пирокатехина, пирогаллола и т. п., обладающих стандартными потенциалами ниже 800 мв . Испытуемые вещества всегда вводились в эмульсию в одинаковых условиях. К 30 мл эмульсии добавлялось $0,5\text{ мл}$ $0,2\%$ -ного раствора (водного или спиртового, смотря по растворимости) исследуемого вещества. В некоторых случаях, когда растворимость была весьма мала, концентрация вводимого раствора была понижена. Иногда пластинки погружали на несколько минут в раствор, содержащий 2 мл $0,2\%$ -ного раствора вещества и 98 мл воды. Все испытания повторяли не менее 2 раз.

Результаты всех этих испытаний согласуются со сделанным выше предположением — все соединения с потенциалами выше 800 мв в большей или меньшей степени сенсibiliзируют пластинки к частицам, а обычные проявители вызывают только образование вуали. Во всех случаях наблюдалось увеличение вуали со временем хранения пластинок после полива (для слоев, содержащих проявляющее вещество).

Однако между величиной потенциала и сенсibiliзирующей способностью не наблюдалось прямой связи. Так, например, эмульсия, содержащая дифениламин с потенциалом $1\,076\text{ мв}$, регистрировала электронные следы, состоящие из 8 зерен; та же эмульсия, обработанная 1,3,5-триоксibenзолом с потенциалом 827 мв , регистрировала только короткие следы из 5 зерен. Можно

было ожидать, что с приближением потенциала к 800 мв сенсibiliзирующий эффект будет возрастать. Поскольку этого не было, следовательно, должен существовать другой весьма важный фактор, определяющий сенсibiliзирующую способность такого соединения; повидимому, этим фактором являются электроннодонорные свойства некоторых групп соединения.

Освобождение электрона, повидимому, облегчается в тех случаях, когда соединение обладает гетероциклической структурой. Среди веществ первой серии опытов было исследовано флуоресцирующее соединение, дегидротитолуидинсульфоновая кислота, которое оказалось сравнительно хорошим сенсibiliзатором, позволив регистрировать следы из 35 зерен. Такое сильное сенсibiliзирующее действие было приписано присутствию групп NH_2 и гетероциклов с атомами S и N.

В следующей серии опытов были испытаны соединения, содержавшие, кроме групп NH_2 и OH , различные гетероциклические группы. Среди этих соединений были новые производные пиразола с одной или двумя боковыми цепями с группами NH_2 на конце. Эти соединения были недавно синтезированы Вицингером. К ним относится упомянутый выше наиболее энергичный из испытанных сенсibiliзаторов.

Родственные соединения с одной боковой цепью также оказались сенсibiliзаторами, но менее энергичными, чем соединения с двумя боковыми цепями.

Опыты с аналогичными веществами, содержащими вместо групп NR_2 замещенные группы OH или вообще не содержащими этих групп на конце цепи, дали различные результаты. Эмульсии, сенсibiliзированные соединениями, содержащими группу OR , регистрировали только весьма короткие следы. Хорошо известно, что замещение группы OH в проявляющем веществе уменьшает или уничтожает проявляющую способность, что указывает на почти полное прекращение перехода электронов от проявляющего вещества на бромистое серебро. Соединения, не содержащие этих групп на конце цепи, вообще не оказывают сенсibiliзирующего действия.

Дальнейшие опыты с соединениями, содержащими две группы $-\text{CH}=\text{CH}-$ в цепях, показали, что в этом случае сенсibiliзирующий эффект меньше, чем для соединения с одной группой $-\text{CH}=\text{CH}-$. Этот краситель действует как оптический сенсibiliзатор к желтой и оранжевой областям. Интересно было бы испытать аналогичное соединение без виниловой группы. Возможно, что оно оказывало бы еще более сильный сенсibiliзирующий эффект, однако пока еще не удалось произвести необходимые испытания.

Другие опыты показали, что присутствие групп, подобных NO_2- , $-\text{N}=\text{N}-$, $-\text{COOH}$, в соединении, содержащем активные

группы NH_2 или OH , уменьшало или уничтожало сенсibiliзирующую способность.

Если сравнить группы, усиливающие сенсibiliзирующее действие, с группами, оказывающими отрицательное влияние, то можно будет заметить близкую аналогию с поведением сенсibiliзирующих красителей. Группы NH_2 , NR_2 , NRH и OH являются ауксохромами, отрицательно влияющие группы представляют хромофоры. Ауксохромы являются электронодонорными группами. Хромофоры захватывают электроны и поэтому уменьшают или уничтожают сенсibiliзирующую способность соединения, в котором они присутствуют.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хельг В., Иенни Л., Фотографический метод в ядерной физике, сб., Издательство, 1952, статья 7.
2. Demers P., Phys. Rev., **70**, 86 (1946).
3. Amman-Brass H., Kolloid-Z., **110**, 105, 161 (1948).
4. Заяц Б., Росс М., Фотографический метод в ядерной физике, сб., Издательство, 1952, статья 29.
5. Stenger E., Staude H., Fortschritt der Photographie, Leipzig, 1938, p. 64; герм. пат. 558419, I. G. Farbenindustrie.
6. Jenny L., Helv. chim. Acta, **32**, 315 (1949).
7. Fieser L., J. Am. Chem. Soc., **52**, 5204 (1930).

8

Г. Мелманс, Г. Оккиалини и А. Винсент

ЗАГРУЗКА ЯДЕРНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ТОНКИМИ ПРОВОЛОКАМИ

G. Meulemans, G. P. S. Occhialini, A. M. Vincent, Nuovo Cimento, **8**, No 5, 341—344 (1951).

Во многих работах по ядерной физике и космическим лучам представляет интерес исследовать расщепления ядер некоторого элемента или группы элементов, не являющихся нормальной составной частью фотоземлюсии, или же сразу распознать элементы, с которыми произошли определенные превращения.

Обычный способ загрузки заключается либо во введении исследуемого элемента (например, В, Bi, Li) в виде одной из его растворимых солей в процессе изготовления эмульсии, либо в пропитке сухой эмульсии раствором, содержащим данный элемент. Выбор элементов, которые могут быть введены в пластинку этим способом, ограничен химическими свойствами эмульсии, и, кроме того, введение посторонних элементов может привести к значительным затруднениям в процессе фотографической обработки [1]. В этом случае для изучения расщеплений,

вызванных в постороннем элементе, необходимо произвести сравнение результатов статистической обработки данных для обычной и загруженной-пластинок.

Более прямой метод исследования заключается в помещении тонкой фольги материала между двумя эмульсионными слоями, которые маркируются рентгеновскими лучами обычным способом [2]. Такой метод обладает тем достоинством, что все следы, возникающие в поверхности или в тесной близости к ней, могут быть непосредственно приписаны изучаемому элементу [3]. Недостатком этого метода является большая потеря следов, обусловленная неблагоприятными геометрическими условиями опыта, и довольно значительная затрата времени на определение положения обеих половин следа при помощи изображения сетки, полученного на эмульсии посредством рентгеновских лучей.

Понятно, что наилучшие геометрические условия опыта достигаются способом суспендирования постороннего элемента в эмульсии в микроскопически видимой форме, лучше всего в виде зерен размером в несколько микрон. В случае углерода это было достигнуто путем использования тонкой алмазной пыли [4]. Приближением к таким идеальным условиям является метод тонких проволок. Многие вещества могут быть получены в виде проволок или нитей толщиной в несколько микрон. При правильном их натяжении и расположении эмульсии эти нити дадут сетку, в которой можно наблюдать интересующие нас процессы. Геометрические условия здесь более благоприятны, чем в методе фольг, но уступают методу зерен. Преимущество этого метода состоит в более быстром просмотре пластинки, поскольку он сводится к простому просмотру вдоль проволок вместо последовательного просмотра одного поля зрения за другим по всей толще эмульсии.

Настоящая заметка представляет предварительное сообщение по применениям этого метода. Эмульсию поливали на стеклянную пластинку, над которой была закреплена сетка из натянутых параллельных нитей. Предварительные опыты с торием, осажденным на нейлон и платину, позволили проверить прямолинейность следов α -частиц; вопреки ожиданиям, авторы не обнаружили значительной деформации эмульсии вокруг проволок.

Пластинки с эмульсией толщиной 200 μ , содержавшие сетки из платиновой проволоки диаметром 30 μ с промежутками между проволоками в 1 мм, облучались на Пике дю Минди. В каждой из этих пластинок площадью $10,24 \times 10,24$ см содержалось $2,1 \cdot 10^{22}$ атомов серебра, $2,06 \cdot 10^{22}$ атомов брома и $0,046 \cdot 10^{22}$ атомов платины. Вследствие высокого атомного номера платины и повышенной скорости просмотра эмульсии, обусловленной локализацией элемента в тонких проволоках, действительное число звезд от космических частиц в платине имеет тот же порядок, что и число звезд, наблюдаемое в бромиде серебра за равное время

просмотра с полем зрения диаметром около 500μ . Преимущество метода проволок заключается также в возможности идентификации элементов — продуктов превращения атомов металла проволоки, а недостаток его состоит в некоторой потере следов внутри проволок.

Авторы измерили искажение формы следов в этих пластинках. В непосредственной близости к проволокам наблюдается значительное усиление искажения, зависящее от положения и наклона следов. Это местное искажение становится ничтожным на расстоянии около 30μ от проволоки. Описываемый метод уже теперь пригоден для точных измерений; это следует из того, что следы частиц высокой энергии проходят через несколько проволок без изменения своего направления и в слое наблюдаются связанные следы, горизонтальные проекции которых пересекаются в точке, положение которой может быть определено с точностью в $1-2 \mu$ путем проведения касательных к направлениям проекций на расстоянии 30μ от проволоки. В более новых партиях пластинок искажение следов было еще более уменьшено путем улучшения способа укрепления проволок. На приведенном рисунке изображен протонный след, проходящий через одну из проволок.

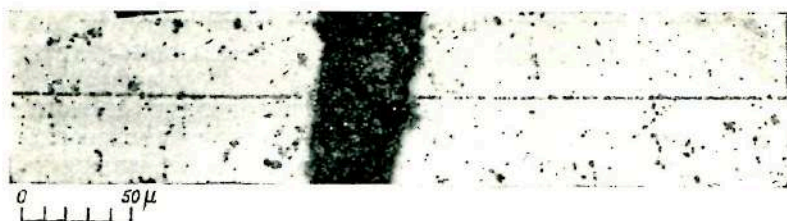


Рис. 1.

Вполне очевидны возможности широкого применения этого метода в ядерной физике. В исследованиях космических лучей мы встречаемся с целым рядом случаев, в которых интересно определить зависимость от атомного номера таких событий, как например расщеплений, вызываемых σ -мезонами, образования звезд, рождений мезонов, поперечного сечения образования пар γ -квантов и т. п. Этот метод может оказаться весьма полезным для изучения рассеяния и удельных потерь энергии быстрых частиц в известных элементах. Он весьма напоминает метод камеры Вильсона со свинцовыми пластинками, но в сильно уменьшенном масштабе.

Наряду с облучением космическими лучами пластинок, загруженных проволоками из тяжелых элементов, авторы использовали тот же метод для работы с легкими элементами. Применение нейлоновых и шелковых нитей не оказало вредного влияния

на эмульсию и проявление, а прозрачность этих нитей представляла дополнительное преимущество, поскольку использование вещества с показателем преломления, близким к показателю преломления эмульсии, уменьшало оптическое искажение вокруг проволок. Дальнейшее развитие этого метода заключается в замене проволок тонкими капиллярами, наполненными жидкостями или газами под давлением. Эта часть работы продолжается в настоящее время.

ЛИТЕРАТУРА

1. Picciotto E., Compt. rend., Mars, 1948; Broda E., Nature, **160**, 231 (1947); J. Sci. Instr., **24**, 136 (1947).
2. Bates W. J., Occialini G. P. S., Nature, **161**, 473 (1948).
3. Harding J. B., Nature, **163**, 440 (1949); Hodgson P. E., Phil. Mag., **42**, 324, 82 (1951).
4. Berriman W., частное сообщение; Waller C., частное сообщение.

9

М. Дэниц и Г. Иекутиели

ЗАГРУЗКА ЯДЕРНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ПРОВОЛОКАМИ

M. Danysz, G. Yekutieli, Phil. Mag., **42**, No 333, 1185—1186 (1951).

Метод загрузки ядерных эмульсий проволоками, аналогичный недавно описанному в литературе *, был независимо разработан в нашей лаборатории. Для загрузки были использованы нейлоновые нити и медные проволоки толщиной 25, 40 и 60 μ . Обычно при загрузке веществами, не реагирующими с эмульсией, проявление пластинок не представляет никаких трудностей. Авторы нашли, что в случае веществ, реагирующих с эмульсией, например меди, удовлетворительная защита эмульсии может быть достигнута покрытием проволок тонким слоем эмали.

Наиболее важной технической задачей, встречающейся при обработке таких пластинок, является устранение искажений, создаваемых присутствием проволок. Эти искажения возникают в результате объемных изменений эмульсии и перемещений проволок относительно эмульсии во время обработки. Искажение быстро увеличивается с толщиной проволок и обусловлено двумя основными причинами:

1. «Продольное» искажение вызывается продольным перемещением проволок относительно эмульсии. При помещении в эмульсию проволоки находятся под легким натяжением, которое должно быть устранено в начальной стадии сушки, чтобы они

* См. статью 8, стр. 103.

не остались в таком состоянии в эмульсии. Если же в сухих пластинках останется какое-либо натяжение, то оно будет «освобождено» в процессе обработки, что приведет к смещению эмульсии и следов в непосредственной близости к проволокам.

2. «Объемное» искажение вызывается усадкой эмульсии вокруг проволок после обработки; оно более опасно, чем «продольное» искажение.

Для устранения как продольного, так и объемного искажений был разработан следующий метод загрузки эмульсии проволоками и нитями. Прежде всего, проволоку или нить равномерно наматывали на специальную рамку при помощи токарного станка (рамка *аа* на рисунке); проволоку или нить закрепляли на рамке

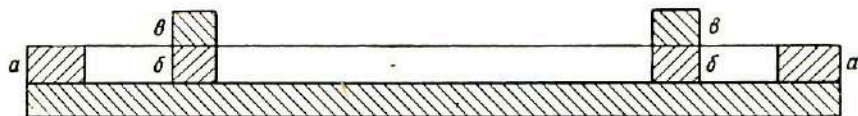


Рис. 1.

шеллаком. Рамку изготавливали из стекла толщиной 1 мм и шириной 1 см. Половину нитей отрезали, оставляя только нити, находившиеся на одной стороне рамки.

Эмульсию поливали на пластинки из специально обработанного стекла (фирмы Ильфорд). Сначала на такую пластинку помещали другую стеклянную рамку *бб*, внутренняя поверхность которой была равна требуемой поверхности эмульсии. Верхняя и нижняя поверхности этой рамки были предварительно смазаны вазелином. Затем на пластинку помещали большую рамку *аа* так, чтобы нити или проволоки покоились на верхней поверхности рамки *бб* без изгиба или дополнительного натяжения. На рамку *бб* помещали третью рамку *вв*, в точности равную *бб* и также смазанную вазелином.

Далее на стеклянную пластинку поливали эмульсию — на участок, ограниченный рамками *бб* и *вв*, до тех пор пока поверхность эмульсии в точности не сравнивалась с верхней поверхностью рамки *вв*. После застудивания эмульсии, происходящего обычно через 1,5 часа, проволоки отрезали от рамки острым лезвием бритвы и рамки удаляли. Точное определение момента перерезания проволок было весьма существенно, так как эмульсия должна была быть достаточно твердой, чтобы поддерживать проволоки, но еще не столь неподвижной, чтобы «заморозить» натяжения. В результате высыхания эмульсия усадала до толщины около 300 μ .

Наиболее значительное искажение — объемное — возникает в результате удаления больших количеств галогенида серебра

при обработке, что ведет к усадке одной эмульсии, но не проволок. Единственным способом устранения объемного искажения является предупреждение усадки эмульсии, чего авторам удалось достигнуть следующим методом.

Соль серебра была замещена подходящим прозрачным веществом посредством введения смолы в эмульсию. Для этого после промывки пластинки вода, содержавшаяся в эмульсии, замещалась спиртом путем погружения в ряд растворов с постепенно возрастающей концентрацией спирта. После этого пластинки погружали в спиртовой раствор смолы примерно на два дня и оставляли до высыхания.

Конечная толщина эмульсии зависела от концентрации раствора смолы и времени пропитки. Концентрация около 30 г смолы в 100 мл спирта и пропитка в течение двух дней давали эмульсию с толщиной, близкой к исходной (до обработки). Этот метод позволял получить еще большую толщину, так что эмульсия расширялась, а не сжималась.

Рассмотрение пластинок, загруженных нейлоновыми нитями, облученных космическими лучами и обработанных этими методами, показало, что оба вида искажения эмульсии были почти полностью устранены. Авторы полагают, что, помимо использования в данном специальном случае, метод пропитки эмульсии смолой и другими веществами может иметь другие более общие преимущества и применения. Этот вопрос будет рассмотрен в следующем сообщении.

10

А. Бонетти и Г. Оккиалини

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЭМУЛЬСИИ

A. Bonetti, G. P.³² S. Occhialini. Nuovo Cimento, 8, No 9, 725—727 (1951).

В одной из предыдущих работ * было указано, что метод загрузки эмульсий тонкими проволоками можно применить к анализу ядерных процессов, происходящих в жидкости или газе, если заменить проволоки капиллярными трубками. На рис. 1 показаны результаты испытания такого метода. Тонкостенные стеклянные трубки располагались в виде решетки над стеклянной пластиной, на которую затем поливалась эмульсия. Некоторые из этих трубок были наполнены раствором Р³² (неизвестной концентрации), а некоторые оставлены пустыми.

* См. статью 8, стр. 103.

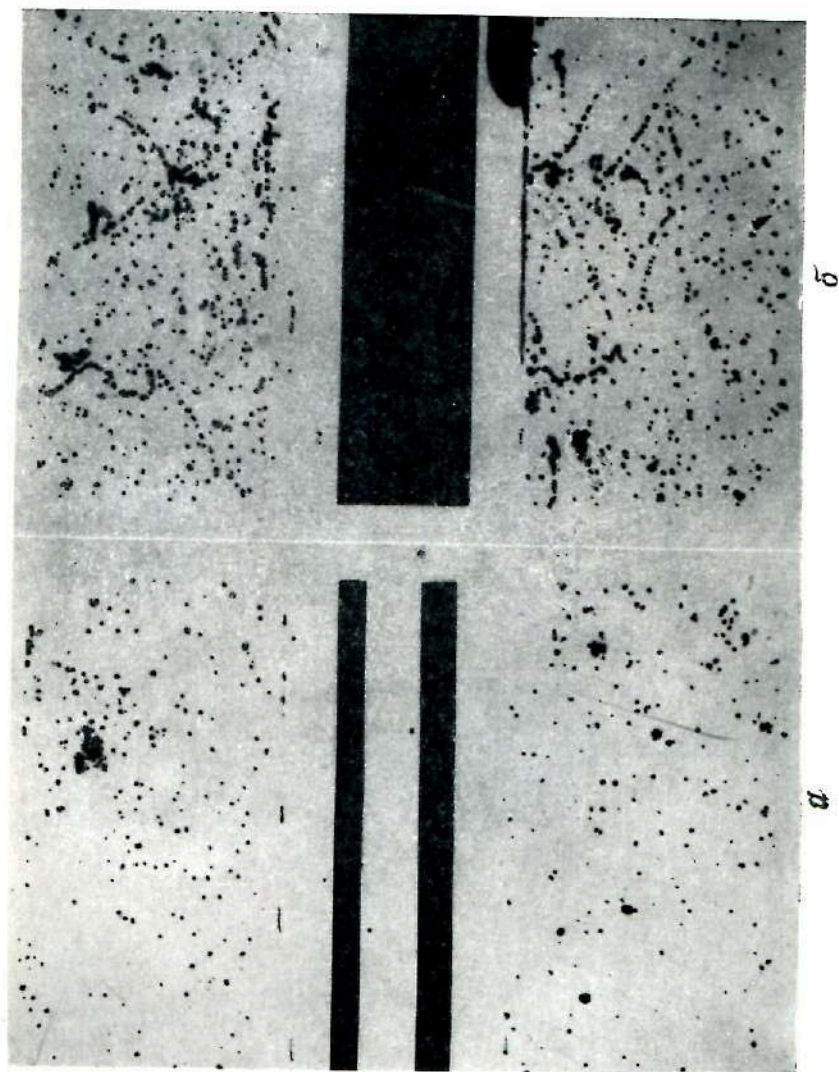


Рис. 1.

Иммерсионная среда

Поверхностные зерна

$\alpha\text{-ThC}$ →

Эмульсия

← $\alpha\text{-ThC}$

Стеклянный цилиндр

Р и с. 2.

На снимке 1, *а* изображена пластинка вблизи пустой трубки, на снимке 1, *б* — вблизи наполненной трубки после нескольких часов экспонирования.

Малый объем пробы жидкости и возможность определять точку испускания частицы придает довольно большую ценность фотографическому методу исследования. Если отсутствует столь высокая коллимация частиц, как в звездах от космических лучей, то трудность прослеживания слабо ионизирующей частицы в эмульсии (если ее след не лежит в плоскости, нормальной к лучу зрения) приводит к большой потере в телесном угле. Следующей естественной ступенью является использование трубки или проволоки в качестве подложки для эмульсии таким образом, чтобы образовалась цилиндрическая пластинка.

При этом возникает трудность, связанная с «искривлением» следов, не находящихся в плоскости, проходящей через ось цилиндра. Это явление обусловлено усадкой эмульсии. Его можно предупредить, если дать эмульсии набухнуть до сушки в жидкости, которая легко поглощается эмульсией и не слишком отличается от эмульсии по показателю преломления. В первых опытах по устранению усадки [1] были использованы повышенные концентрации глицерина на стадии, предшествующей сушке. Пластинки, пропитанные раствором глицерина в воде до сушки, давали меньшее искажение следов, чем пластинки, высушенные непосредственно после промывки [2], и авторы полагали, что это связано с уменьшением усадки эмульсии. Миньон и Бонетти [3] показали, что путем пропитки пластинок 10—15%-ным раствором глицерина (в зависимости от типа эмульсии и способа обработки) в течение достаточного времени можно получить сухие пластинки, имеющие такую же толщину, как до обработки. Такой метод, весьма пригодный для уменьшения искажения следов вокруг проволок в пластинках с проволочными сетками, может быть использован для предупреждения искривления следов в цилиндрической эмульсии.

Этот метод был применен к обычным испытаниям звезд от α -частиц тория. На стеклянные цилиндры радиусом 1 мм путем поливки был нанесен слой эмульсии толщиной 120 μ . Эмульсию после сушки пропитывали раствором нитрата тория и оставляли на несколько дней для получения достаточного числа следов. Проявление и фиксирование производилось в соответствии с имеющимися инструкциями [4], во избежание натяжений, которые могли бы изменить форму эмульсионного цилиндра. Перед сушкой эмульсию пропитывали 6 час. в 13%-ном растворе глицерина. На рис. 2 видны следы α -частиц ThC' , перпендикулярные и параллельные оси цилиндра. Первый след имеет длину 43 μ , второй — 46 μ ; это показывает, что концентрация глицерина была

почти достаточна для восстановления обработанной эмульсии практически до исходного объема.

Из приведенных снимков видно, что в обычных оптических условиях качество снимка низко. В связи с применением цилиндрической эмульсии возникает ряд проблем. Помимо необходимости в специальном стекле для полива эмульсии, возможно, понадобится изменить оптическое и механическое устройство микроскопа, чтобы полностью использовать все возможности метода. Для цилиндров большего диаметра наблюдение следов должно производиться при помощи специального длиннофокусного иммерсионного объектива и конденсора. Действительно, даже в случае применения трубок радиусом 1 мм горизонтальный след на рис. 2, находящийся в $100\ \mu$ от поверхности, рассматривается через слой эмульсии толщиной около $400\ \mu$. Необходимо предусмотреть наблюдение в отраженном свете, если в качестве эмульсионной подложки используется металл.

Даже в случае тонкослойной цилиндрической эмульсии ее полив и обработка требуют большей тщательности, чем обычные пластинки.

Учитывая указанные трудности, применение этого метода можно оправдать только в том случае, если он упрощает решение различных задач.

Поскольку проблема усадки эмульсии решена, цилиндрическая эмульсия может во многих случаях применяться для тех же целей, что и эмульсия с проволоочными сетками и толстослойная эмульсия. Так как она позволяет наблюдать след частицы, идущей вертикально до стеклянной подложки, то цилиндрическая эмульсия может быть легко использована для таких целей, как комбинация цилиндрической пластинки с геликоидальной фокусировкой, использование их в схеме совпадений в качестве телескопа космических лучей. Кроме того, можно наполнять трубки (носители эмульсии) газами под высокими давлениями.

Этот метод может иметь некоторое применение для локализации радиоактивных участков в тканях. Для выяснения указанной возможности был поставлен модельный опыт, в котором радиоактивный источник (α -активное вещество) помещался в углубление деревянного бруска на небольшом расстоянии от двух скрещенных цилиндрических пластинок. Фотографическая иллюстрация результатов этого опыта слишком сложна и поэтому опущена, но это грубое испытание показало, что по направлению следов частиц можно весьма точно установить местонахождение источника.

Приблизительная локализация может быть произведена достаточно быстро на основе того, что следы присутствуют только на стороне цилиндра, обращенной к источнику. Эта направлен-

ность дает такому типу «игольчатого» детектора некоторое небольшое преимущество перед «слепым» детектором типа счетчика Гейгера или игольчатого кристалла [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бюллетень фирмы Илльфорд, № 47-а.
2. Dainton A. D., Gattiker A. R., Lock W. O., Phil. Mag., 42, 396 (1951).
3. Bonetti A., Mignone G., частное сообщение.
4. Dilworth C., Occhialini G. P. S., Vermaesen L., Bull. Centre phys. nucl., Bruxelles, Note № 13-a; Bonetti A., Dilworth C., Occhialini G., Bull. Centre phys. nucl., Bruxelles, Note № 13-b.
5. De Kohl D., Nucleonics, 8, № 3, 79 (1951).

11

А. Герц и К. Уоллер

НОВАЯ ЯДЕРНАЯ ЭМУЛЬСИЯ

A. J. Herz, C. Waller, Phil. Mag., 43, No 340, 592—594 (1952).

Ядерные эмульсии часто применяются для изучения свойств тяжелых ядер в космических лучах. Для идентификации этих частиц используется несколько методов, которые основаны на определении удельных потерь энергии в сочетании с определением остаточного пробега или рассеяния. Если частица движется с релятивистской скоростью, то удельные потери энергии пропорциональны квадрату ее заряда, и идентификация возможна при помощи измерения только одних потерь энергии.

В большинстве исследований требуется эмульсия, чувствительная к частицам любой ионизирующей способности. В таких эмульсиях следы тяжелых ядер представляют собой непрерывную цепочку зерен, и удельные потери энергии не могут быть определены прямым счетом зерен. Эта трудность была преодолена двумя способами. Во-первых, можно измерить плотность δ -электронов вдоль следа (эта величина тесно связана с полной ионизацией) [1—3] или измерить расширение оси следа, вызываемое δ -электронами малой энергии [4]*. Второй метод заключается в облучении плотно упакованной стопки пластинок, в которой высокочувствительные эмульсии чередуются с эмульсиями весьма малой чувствительности [5]. В этом методе возможен счет зерен в следах тяжелых ядер, и удельные потери энергии могут быть определены прямым путем. Преимущества этого метода состоят в том, что

* См. также статью 32, стр. 269.

счет зерен прост и быстр, что статистическая точность для следа данной длины выше, чем в методе счета δ -электронов, и что счет зерен не столь субъективен, как счет δ -электронов, и поэтому не требует разработки и соблюдения ряда специальных сложных условий работы. Недостаток метода счета зерен состоит в необходимости калибровать каждую партию пластинок в отдельности. Другие недостатки метода счета зерен, в том виде как он применялся ранее [5], состоят в необходимости специального проявления малочувствительных пластинок для получения требуемой

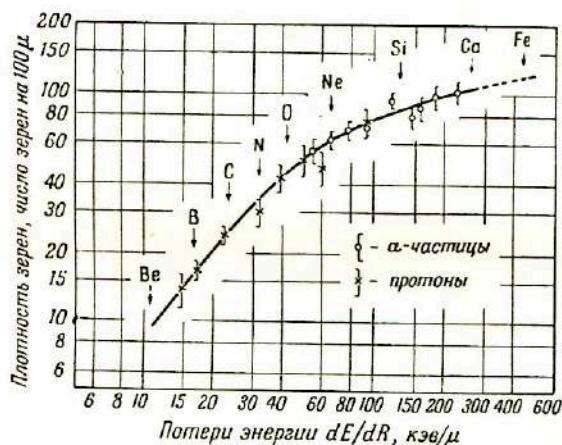


Рис. 2. Зависимость плотности зерен от потерь энергии в эмульсии G0.

Ошибки представляют средние квадратичные отклонения, если принять распределение Пуассона. Указаны предполагаемые плотности зерен для различных релятивистских ядер.

малой чувствительности и в том, что следы приходится прослеживать на их пути через целую стопку пластинок.

В целях устранения этих недостатков метода счета зерен была разработана опытная эмульсия тип G0, которая отличается от эмульсии G5 только иной чувствительностью.

Эмульсия G0 проявляется и фиксируется точно такими же методами, как эмульсия G5, что позволяет использовать толстые слои и наносить несколько чередующихся слоев эмульсий G0 и G5 на одной и той же стеклянной пластинке. Из рис. 1 следует, что граница раздела между двумя эмульсиями видна совершенно отчетливо.

Зависимость между плотностью зерен и удельными потерями энергии в партии эмульсии G0 определялась путем счета зерен в слоеной пластинке, состоящей из слоя эмульсии G5 толщиной 400 м, покрытого слоем эмульсии G0 толщиной 200 м. Полученная

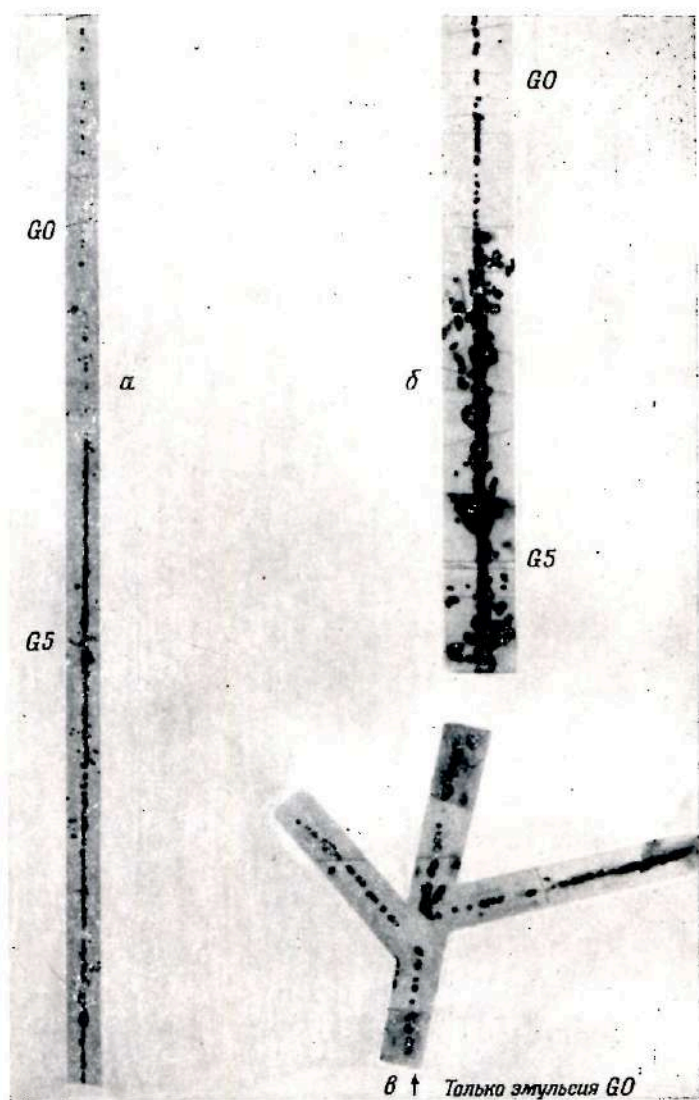


Рис. 1. Следы в слоистой эмульсии G5/G0.
 а и б — тяжелые ядра, в — звезда от радиосактивного распада. Масштаб для
 б и в одинаков и отличается от масштаба для а.

кривая изображена на рис. 2. Пластинку проявляли амидол-бисульфитным проявителем * до средней минимальной плотности зерен (в G5), равной 26 зерен на 100 μ . Для калибровки использовались следы α -частиц и однозарядных частиц, останавливающихся в эмульсии, причем все однозарядные частицы принимались за протоны.

Целью разработки новой эмульсии G0 было упрощение работы по идентификации тяжелых ядер, повышение точности при данной длине следа и повышение отношения количества эмульсии к стеклу в стопке пластинок. Эмульсия G0, повидимому, удовлетворяла всем этим условиям. Помимо применения для исследования космических лучей, эту эмульсию можно с успехом использовать в ядерной физике, поскольку она является малочувствительной эмульсией, которая может применяться в виде весьма толстых слоев либо самостоятельно, либо в виде многослойной комбинации со слоями электроночувствительной эмульсии. Работа по получению эмульсий такого типа продолжается. Повидимому, окажется желательным изготавливать ряд эмульсий с несколько различающимися характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bradt H. L., Peters B., *Phys. Rev.*, **74**, 1828 (1948).
2. Hoang Tchang-Fong, Диссертация, Paris, 1950.
3. Sorensen S. O. C., *Phil. Mag.*, **40**, 947 (1949).
4. Blau M., Rudin R., Lindenbaum S., *Rev. Sci. Instr.*, **21**, 978 (1950).
5. Брадт Г., Питерс Б., Фотографический метод в ядерной физике; сб. Издательский центр, 1952, статья 35.

* См. статью 15, стр. 152.

С. Дилворс, Г. Оккиалини и Л. Вермезен

ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТОЛСТОСЛОЙНЫХ ЭМУЛЬСИЙ. ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ

C. C. Dilworth, G. P. S. Occhialini, L. Vermaesen, *Photogr. Sensitiv.*, pp. 297—309.

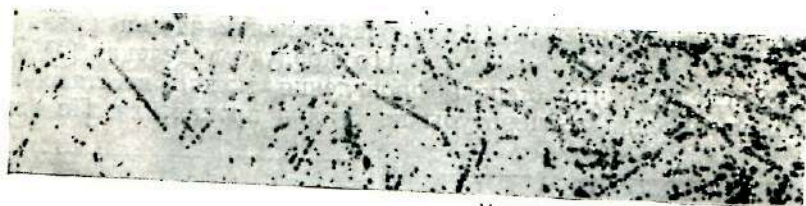
Несмотря на весьма большие успехи, которые были достигнуты за последние годы в области применения фотографических пластинок для ядернофизических исследований, вопросам фотографической обработки вплоть до последнего времени уделялось мало внимания. Уже в начале работы по температурному проявлению [1] было очевидно, что большие успехи в области повышения чувствительности пластинок и разнообразия их применения указывают на возможность использования их не только в качестве регистрирующего, но и измерительного прибора, который при правильной обработке может дать значительную степень точности. Такая обработка должна была удовлетворять четырем требованиям: 1) метод проявления пластинок должен был обеспечивать одинаковую плотность зерен по глубине и по поверхности; 2) процесс проявления должен был контролироваться таким образом, чтобы для всех пластинок одной и той же партии поддерживались идентичные условия проявления; 3) метод должен был позволять обрабатывать пластинки со слоем такой толщины, в которой можно было бы производить измерения плотности зерен и рассеяния на больших отрезках следов с целью достижения максимально возможной точности (последнее требование стало еще более настоятельным в связи с разработкой пластинок максимальной чувствительности); наконец, 4) пластинки, в которых необходимо было измерять малые углы рассеяния порядка $0,1$ градус/см на протяжении нескольких сантиметров длины следа, должны были обрабатываться таким способом, который обеспечивал бы минимальную деформацию эмульсии.

В настоящей статье описываются способы, при помощи которых авторы пытались провести обработку в соответствии с выше

поставленными требованиями. Принцип предлагаемого метода довольно стар. Он основан на различной активности проявителя при низкой и высокой температурах. Исходя из этого свойства, авторы разделили проявление на три стадии. Во время первой, низкотемпературной стадии, когда проявитель только пропитывает эмульсию, изображение почти или совсем не образуется. На второй стадии температура повышается, и происходит проявление скрытого изображения. На третьей стадии проявление прекращают одновременно по всей глубине пластинки путем понижения температуры, и пластинка погружается в останавливающий раствор. После этого следует фиксирование.

§ 1. Выбор проявителя

Так как температурные коэффициенты процесса проявления не особенно сильно отличаются для разных проявителей, то для целей данной работы можно было с успехом использовать любое проявляющее вещество. Но все же было желательно, чтобы это вещество обладало определенными свойствами, которые редко



Увеличение pH →

Рис. 1. Различение осколков деления урана и α -частиц при помощи проявителя с малым значением pH (рецепт Стивенса [2]).

встречаются одновременно у одного проявителя. Эти свойства таковы:

- 1) устойчивость к окисляющему действию воздуха;
- 2) низкая щелочность — сильно щелочной проявитель вызывает набухание эмульсии и последующую деформацию в теплом проявляющем растворе;
- 3) низкая концентрация — проявители высокой концентрации непригодны вследствие опасности выпадения осадка при низкой температуре; проверку возможности этого следует производить при работе с любым проявителем;
- 4) простота — проявители, содержащие много веществ, могут оказаться непригодными, если скорость проникновения в эмульсионный слой и температурные коэффициенты диффузии разных компонентов проявителя будут различны;

- 5) сильное буферное действие;
- 6) высокая чувствительность к бромиду;
- 7) слабое растворяющее действие на галогениды серебра.

Детальное описание различных рецептов проявителей, которые авторы использовали для решения разных вопросов, приведено в приложении III к этой статье. В случае эмульсий толще 300 μ было удобно увеличивать период, в течение которого проявления не происходит, добавляя к проявителю бромид калия или другие замедлители.

Еще более толстые слои можно было проявить подкисленным проявителем. Время проявления для данного почернения увеличивается при уменьшении pH. Рис. 1 демонстрирует падение активности проявителя с уменьшением pH, используемое при исследовании различия α -частиц урана и его продуктов деления [2]. Из

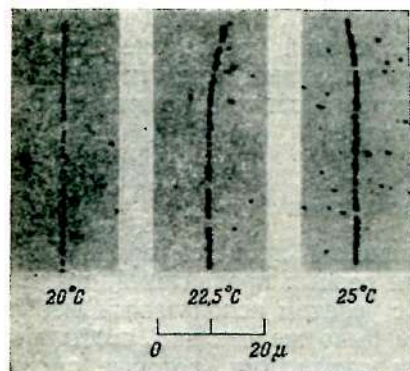


Рис. 2. Следы частиц от реакции расщепления ${}^7\text{Li}^{17} (n, \alpha) {}^4\text{He}^3$ [3].

рис. 2 следует, что степень проявления можно восстановить путем увеличения температуры на стадии проявления. По этой

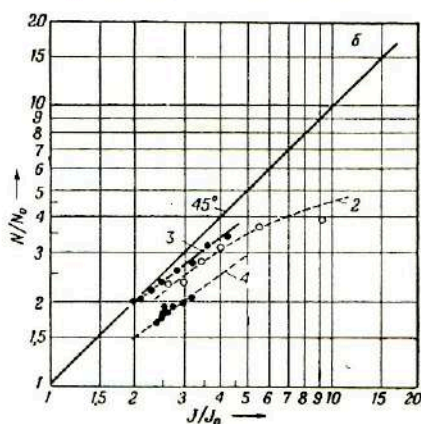
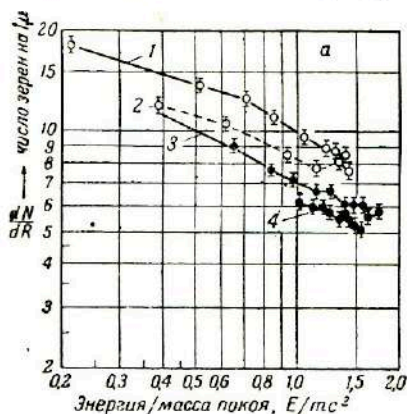


Рис. 3. Результаты счета зерен в следах π - и μ -мезонов.

1—Кодак (1), 2—Кодак (2), 3—Ильфорд (1), 4—Ильфорд (2). N_0 —число зерен на 1 см в следах электронов от распада μ -мезонов.

причине амидол оказался исключительно ценным веществом, так как он способен проявлять в кислой среде (условие 2). Он удо-

влетворяет также условиям 3 и 4. Условие 1 не выполняется, что требует известной осторожности при работе с амидолом, однако в опытах авторов не было обнаружено каких-либо признаков окисления в течение длительных периодов проявления, необходимых при обработке толстослойных эмульсий.

С другой стороны, условием 4 можно пренебречь, если это позволит путем смешения нескольких проявляющих веществ

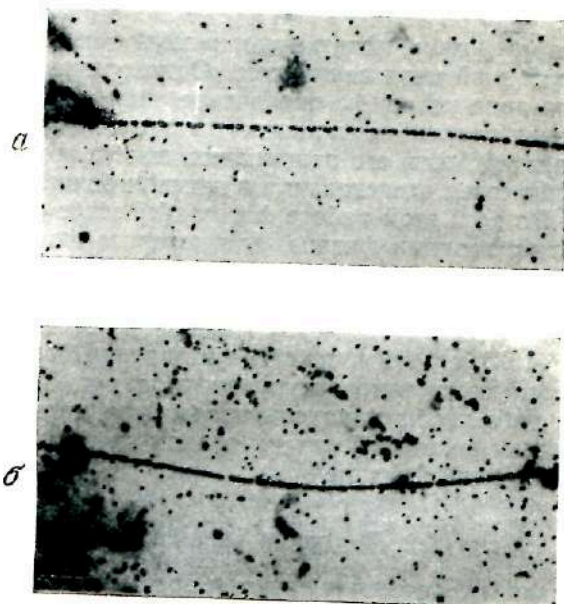


Рис. 4. Следы μ -мезонов в эмульсии Илфорд G5 толщиной 600 μ ; остаточный пробег 600 μ .

a — недопроявление; *b* — полное проявление.

достичь как раз такой степени физического проявления, которая выявит редкие следы без перепроявления (комкования) следов частиц с высокой удельной ионизацией. Сущность этой проблемы видна на рис. 3 и 4. На рис. 3 показаны результаты счета зерен в следах π - и μ -мезонов. Мы видим, что если для малых плотностей зерен наблюдается постоянное, хотя и не пропорциональное увеличение плотности зерен с ионизацией, то при плотностях зерен, более чем в 3 раза превышающих минимальную, мы переходим в область насыщения. Это явление показано на рис. 4, изображающем микрофотографии отрезков следов двух μ -мезонов, каждый на расстоянии 600 μ от конца следа (*a* — в недопроявленной пластинке, *b* — в полностью проявленной пластинке). На

микрофотографии 4а можно сосчитать зерна в этой части следа мезона, но следы частиц, близких к минимальной ионизации, различимы с большим трудом.

Не исключена возможность, что может быть найден проявитель или смесь проявителей, которые давали бы некоторую степень различения частиц малой энергии и одновременно выявляли бы с достаточной четкостью редкие зерна в следах релятивистских частиц. В каждом исследовании толстослойных эмульсий в качестве проявляющего вещества авторы использовали амидол. Он обладает некоторыми недостатками и не может считаться наиболее пригодным для этой цели веществом. Однако лучше было сосредоточить внимание на одном проявителе, который в наибольшей степени отвечал поставленным выше требованиям, и максимально расширить возможности его применения, вместо того чтобы предпринимать обширное исследование в поисках более совершенного проявителя. Во всей этой работе фотографические пластинки рассматриваются с позиции физика, для которого они служат средством научного исследования.

В качестве первого шага на пути к еще более четкому различению можно видоизменить метод температурного цикла, предложенный ранее [1], заменив стадию проявления двумя стадиями, в первой из которых температуру сначала повышают довольно высоко, для того чтобы началось проявление мелких микрокристаллов, а затем во второй стадии зернам дают медленно расти при пониженной температуре.

§ 2. Методика обработки

Пропитывание эмульсии холодным проявителем. Целью такой пропитки является обеспечение полного проникновения проявителя в эмульсию до того, как начнется проявление. Продолжительность пропитки и, следовательно, состав проявителя зависят от толщины эмульсионного слоя. При работе с пластинками со слоем толще 200 μ удобно использовать предварительную пропитывающую ванну для набухания эмульсии и таким образом облегчить последующую диффузию проявляющего раствора. Для этой цели обычно использовали дистиллированную воду как чистую, так и с добавками смачивающих агентов. Такая ванна имеет то преимущество, что, в отличие от других растворов с большей или меньшей щелочностью [1, 3, 4], не влияет на последующее проявление.

В процессе предварительной пропитки температуру медленно понижают до температуры холодного проявителя. Ниже 10° активность проявителя падает скорее, чем скорость его диффузии в эмульсию. Начиная с 5° диффузия становится довольно затруднительной. Пропитку можно осуществить при 0° и даже ниже,

если добавить к проявителю подходящие антифризы (вещества, понижающие температуру затвердевания жидкости), однако преимущества, достигаемые при понижении температуры, влекут за собой недостатки, связанные с ускорением проявления в присутствии некоторых антифризов. Это явление можно устранить соответствующим изменением состава проявителя, однако до сего времени при обработке эмульсионных слоев толщиной от 200 до 400 μ (Кодак NT4) и от 600 μ до 1,2 мм (Ильфорд G5) не было необходимости понижать температуру ниже 5°.

Для того чтобы проверить, не началось ли проявление уже в холодном растворе, пробную пластинку можно отфиксировать непосредственно после стадии пропитки, т. е. исключить вторую стадию. Вопрос о том, какая степень проявления допустима на этой первой стадии, зависит от характера изучаемой проблемы и от типа ионизирующих частиц, например осколков деления, α -частиц, протонов, мезонов или электронов с разными пробегами и скоростями.

Возможно получить пластинки, совершенно не содержащие следов после низкотемпературной стадии, однако часто вполне допустимо выявление последних 15—20 μ протонного следа в виде зерен, редко расположенных по всей глубине слоя.

Это может служить критерием равномерности проявления, поскольку после окончания пропитки образуется лишь очень слабое изображение. Некоторые экспериментаторы могут считать это требование неоправданно строгим, однако, с другой стороны, иным образом очень трудно проверить выполнение этих двух условий (т. е. полноты пропитки и равномерности проявления) на полностью проявленной пластинке. Существуют два других возможных метода контроля, которые представляют некоторые трудности для интерпретации:

- 1) счет зерен вдоль следов, проходящих прямо через эмульсию;

- 2) сравнение следов частиц с данной ионизацией на данной глубине эмульсионного слоя [5].

В методе 1 должна быть уверенность, что частица обладает достаточно высокой энергией, иначе происходило бы изменение ионизации вдоль следа. Сам след должен быть достаточно длинным, чтобы точность измерения была больше допустимой разницы в плотности зерен. Для следов частиц, близких к минимуму ионизации, это условие выполняется без труда. Труднее обнаружить более плотные следы частиц весьма высокой энергии (очевидно, для этого необходимы α -частицы высокой энергии).

В методе 2 следует отобрать следы, которые созданы частицами с одинаковой удельной ионизацией и лежат в более или менее горизонтальной плоскости. Мезоны и протоны, заканчивающие свой пробег в эмульсии, создают следы известной ионизации, но

в таком следе отдельные участки обычно расположены на разных глубинах слоя. С другой стороны, можно ориентироваться по следам частиц с минимальной ионизацией, которые весьма прямолинейны и могут быть обнаружены в одной плоскости слоя. Однако такой критерий укажет на равномерность проявления только для следов малой плотности.

Нельзя утверждать, что различия в проявлении одинаково влияют на следы с разной плотностью зерен. Влияние на плотные следы, повидимому, более значительно, чем на следы малой

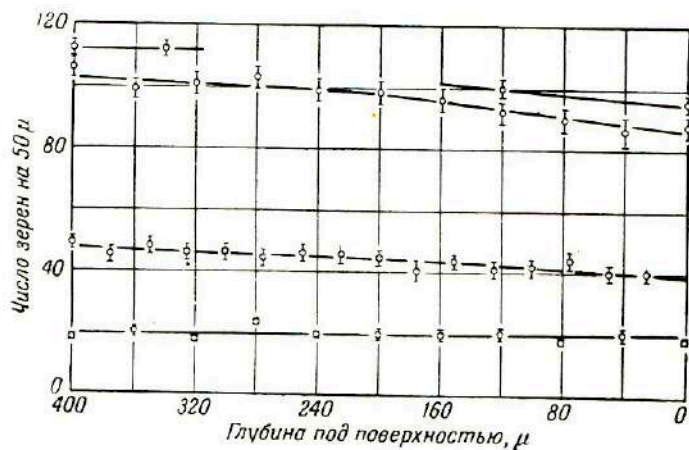


Рис. 5. Изменение плотности зерен вдоль следов частицы с постоянной удельной ионизацией в пластинке с недопроявленной поверхностью.

плотности. На рис. 5 изображены результаты счета зерен в некоторых следах, проходящих через пластинку, которая была специально недопроявлена на поверхности путем разбавления проявителя на высокотемпературной стадии проявления. Как обычно случается в недопроявленных пластинках, зерна на поверхности имели меньшие размеры, чем в глубине, — эффект, который в весьма плотных следах создает впечатление пониженной плотности зерен. Его легко обнаружить, если с микрофотографии следа получить ряд отпечатков при различных выдержках. Счет зерен на микрофотографиях позволяет получить большую точность, чем визуальный метод.

Эти опыты показывают, как влияет особый вид недопроявления (разбавление). Однако в нормальных условиях можно ожидать недопроявления и другого вида. Если на второй, высокотемпературной стадии проявления проявитель еще будет продолжать диффундировать в глубь слоя, то число зерен в неплотных следах

будет оставаться постоянным, хотя их размеры будут уменьшаться, в то время как в следах с высокой плотностью зерен количество проявителя будет недостаточно для полного физического проявления. В результате в областях с высокой плотностью зерен оценка ионизирующей способности частицы будет занижена. Для получения надежных результатов необходимо работать в таких условиях, чтобы проявляющий раствор пропитал весь слой до начала высокотемпературной стадии проявления, т. е. чтобы на этой стадии уже не протекала диффузия проявителя.

Высокотемпературная стадия проявления. После пропитки эмульсии проявляющим раствором температуру повышают для того, чтобы мог протекать процесс собственно проявления.

На этой стадии существенно, чтобы новый проявитель не поступал в эмульсионный слой через поверхность и не создавал в нем градиента проявления. Для устранения этого явления могут быть использованы различные методы.

Разбавление проявителя и нагревание всего раствора или перенесение пластинок в разбавленный раствор, уже находящийся при требуемой температуре. Практически трудно определить оптимальное разбавление, которое одновременно устраняло бы диффузию свежего проявителя в слой и диффузию из слоя проявителя, уже находящегося в эмульсии.

Механическая защита поверхности пластинки. Это можно осуществить, покрывая слой эмульсии сверху стеклянной пластинкой. Прилипание стекла к поверхности эмульсии можно устранить, по крайней мере для малых пластинок, нанося на стекло тонкий слой пчелиного воска [6]. Можно также полить поверхность пластинки маслом, однако его будет трудно удалить впоследствии, т. е. перед останавливающей ванной. Оба эти метода достойны внимания, если требуется равномерно проявить весь слой вплоть до его поверхности и если работа ведется не на большом числе пластинок.

Проявитель выливают и пластинки нагревают в «сухом» виде. Авторы использовали такой метод для проявления пластинок, экспонированных в космических лучах. После удаления проявляющего раствора поверхность пластинок осторожно вытирают фильтровальной бумагой и весь металлический цилиндр или бачок нагревают до требуемой температуры (см. приложение I). Равномерная температура всей пластинки обеспечивается применением металлической подставки и достаточно мелкого проявочного сосуда. Опасность окисления проявителя в поверхностном слое эмульсии в этом методе можно устранить, введя в проявочный сосуд инертный газ.

Условия обработки пластинки на второй стадии, т. е. время и температура проявления, зависят от вида проявителя, типа

пластинки и характера изучаемых явлений. Если требуется произвести различие между частицами с высокой ионизирующей способностью, например осколками деления, и α -частицами, то проявление должно быть мягким (см. приложение III). С другой стороны, при наблюдении частиц с весьма низкой ионизирующей способностью, например электронов, мезонов и протонов с релятивистскими энергиями, проблема заключается в различении следов на фоне вуали. В этом случае необходимо полное проявление, а перепроявление приводит к сильной вуали и затрудняет различение. Авторы обнаружили, что в случае пластинок Ильфорд G5 недопроявление, полное проявление и перепроявление могут быть достигнуты изменением температуры на 1° .

Прекращение проявления. Эта стадия наиболее проста. Сначала проявление останавливают по всему объему слоя путем постепенного понижения температуры. Когда температура упадет, например до 10° , пластинки и сосуд ополаскивают водой при такой же температуре для полного удаления капель проявителя. Затем при $6-9^\circ$ вводится холодный останавливающий раствор.

Удобным останавливающим раствором является разбавленная уксусная кислота. Ее концентрацию следует изменять от 0,2 до 2% в зависимости от щелочности проявителя. Авторы полагают, что 2%-ный раствор, используемый в обычной фотографической практике, является слишком концентрированным при работе с толстослойными эмульсиями.

Время пребывания пластинки в кислом растворе должно быть того же порядка, что и время холодной стадии проявления, т. е. оно должно обеспечить диффузию останавливающего раствора на всю глубину слоя. К концу пребывания пластинки в этом растворе можно допустить повышение температуры до температуры водопроводной воды ($10-15^\circ$). После тщательной промывки пластинок в проточной воде их переносят в фиксаж.

При помощи описанных выше методов удалось проявить пластинки толщиной до 1,2 мм. Равномерность проявления, достигнутая для слоев толщиной 1,2 мм, определенно говорит о том, что проявление слоев толщиной до 3 мм не будет представлять особых трудностей. Следует помнить, что во время высокотемпературной стадии проявитель может диффундировать в глубь слоя, а потому в ряде случаев этот метод без каких-либо изменений может быть использован для слоев толщиной 2 мм.

При переходе к еще более толстым слоям можно воспользоваться следующими тремя способами торможения процесса проявления на низкотемпературной стадии: добавлением больших количеств замедлителей, увеличением кислотности проявителя, дальнейшим понижением температуры холодного раствора проявителя. При переходе к слоям толще 400 μ бромид калия уже

не может служить пригодным замедлителем, если только не использовать проявители с большей чувствительностью к бромиду. Возможности, скрытые в методе подкисления проявителя, которым воспользовались авторы для проявления слоев толщиной до 1,2 мм, еще не исчерпаны. В распоряжении имеется также целая область температур ниже 5° для низкотемпературной стадии. Все эти пока еще не использованные возможности помогут обрабатывать еще более толстослойные эмульсии.

Одно время прогресс в области обработки еще более толстых слоев тормозился недостаточной длиной предметного расстояния иммерсионных объектов. Сухие объективы с большим предметным расстоянием полезны только в известных границах (см. рис. 10), так как они имеют большую глубину фокуса и малую разрешающую силу. Отражательный микроскоп, который мог удовлетворить всем поставленным требованиям в период постановки этой проблемы [7], пока еще недоступен работникам в этой области.

Эта трудность была частично преодолена благодаря применению иммерсионных объектов с большим предметным расстоянием и увеличением 45 (объектив Кука, Трафтона и Симса). Этот новый объектив позволяет использовать описанную ранее методику [7].

Как уже было указано [1], в толстых слоях эмульсии наблюдается помутнение, частично обусловленное накоплением ядерных следов в вышележащих слоях и частично природой желатины и содержащимися в ней загрязнениями. Для пластинок толщиной до 1 000 μ эту трудность можно преодолеть, используя объектив с большим предметным расстоянием и рассматривая половину слоя сквозь стеклянную подложку пластинки. Фотография звезды, находящейся на дне слоя толщиной 600 μ , была получена именно таким способом (рис. 11). Такой метод позволяет производить наблюдения, не испытывая затруднений от различных поверхностных меток и следов. Для толщин порядка нескольких миллиметров этот способ более непригоден, однако в этом случае можно исследовать сначала верхние слои, измеряя и точно отмечая важные события, а затем соскоблить эти слои и исследовать нижние слои. Этим способом была получена фотография № 2 в прежней работе [1], которая изображает след на дне слоя толщиной 700 μ , зарегистрированный при помощи объектива Кука (95X).

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Аппаратура

Авторы пользовались приборами двух типов: один был предназначен для пробного проявления, или для проявления малых

пластинок, другой — для нескольких пластинок больших размеров.

Малые пластинки. Пластинку укрепляют при помощи зажима или лака на платформе из нержавеющей стали, которая вдвигается в толстостенную трубку из нержавеющей стали, закрытую

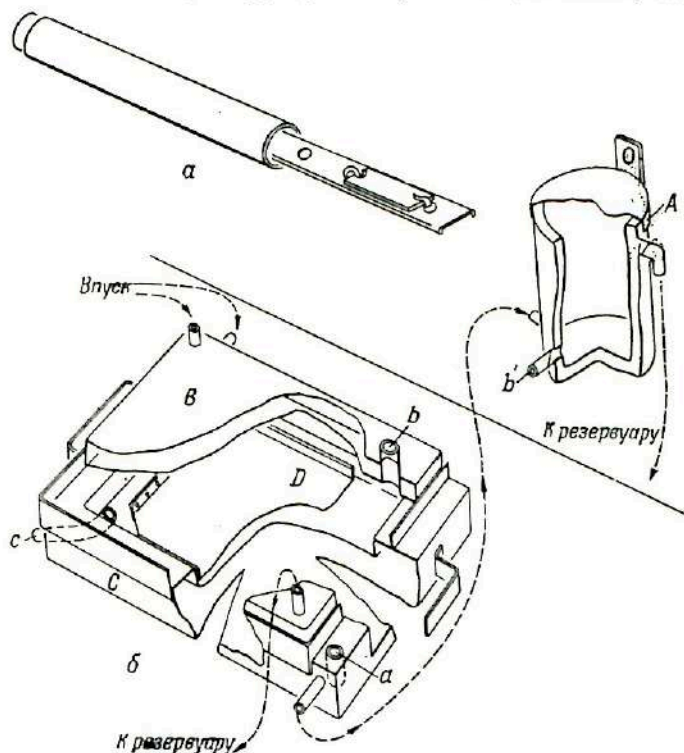


Рис. 6. Прибор для проявления пластинок малых размеров.

a — крепление пластинки; *b* — сосуд с двойными стенками.

резиновой втулкой (см. рис. 6, *a*). Трубку сначала наполняют жидкостью для предварительной пропитки и помещают в воду при 5°. После предварительной пропитки трубку опорожняют и снова наполняют, но только проявителем, уже охлажденным до 5°. Для проведения высокотемпературной стадии проявитель выбрасывают, пластинки осторожно осушают фильтровальной бумагой, трубку снова закрывают и помещают ее в водяную баню при требуемой температуре. Температуру бани поддерживают при помощи термостата с точностью до $\pm 0,10^\circ$. После окончания стадии проявления трубку извлекают и через 1—3 мин.

снова погружают в холодный бачок. После того как температура упадет и проявитель станет неактивным, в трубку наливают оставляющий раствор (при той же низкой температуре). При всех описанных операциях пластинки поддерживают в горизонтальном положении.

После промывки пластинок в проточной воде их переносят в фиксирующий раствор. Изменяя температуру ванны и состав проявителя, находят наилучшие условия проявления. Всегда следует производить окончательное испытание в тех же условиях, в которых будет производиться собственно проявление, например в большом проявляющем бачке на пластинке нормальных размеров.

Большие пластинки. Проявляющий бачок представляет собой светонепроницаемый сосуд с двойными стенками из нержавеющей стали, между которыми циркулирует вода (рис. 6, б). Пластины помещают на плитку нержавеющей стали, которую кладут на дно бачка (серебряная пластинка может служить дорогим, но эффективным заменителем нержавеющей стали). Жидкость для предварительной пропитки и проявляющий раствор вводят через отверстие в крышке и удаляют через тубус в дне. Постоянство температуры на холодной стадии обработки поддерживают при помощи циркулирующей воды из бачка со смесью воды и льда. Ток холодной воды регулируют насосом, управляемым при помощи реле и контактного термометра на выходе; насос приводится в действие всякий раз, когда температура в бачке повышается выше требуемой на холодной стадии проявления.

Для перехода от холодной к теплой стадии проявления в рубашку пропускают теплую воду из бани с температурой 40—50° до тех пор, пока контрольный термометр на выходе не покажет на несколько градусов выше температуры, необходимой для теплой стадии проявления. После этого насос присоединяется к циркуляционному термостату, поддерживаемому при температуре проявления. Предварительные опыты показали, что после начала циркуляции воды при 40—50° требуется около 10 мин., чтобы сама пластинка нагрелась до конечной температуры теплой стадии проявления. Такие измерения всегда должны проводиться для каждого типа бачка, для того чтобы определить тепловую инерцию пластинки в бачке.

После проявления снова подсоединяют холодную воду и температуру снижают до температуры промывной воды. Затем температуру опять снижают до температуры останавливающего раствора. После обработки этим раствором пластинки извлекают для промывки и фиксирования.

Оказалось весьма удобным доводить температуру обрабатываемых растворов до температуры проявляющего бачка путем

помещения их в сосуд с двойными стенками из нержавеющей стали, охлаждаемый водой из циркуляционной системы, обслуживающей проявляющий бачок А (рис. 6, б).

Пользуясь двумя проявляющими бачками, можно переносить лист с пластинками из бачка с низкой температурой в уже термостатированный бачок при высокой температуре, однако следует помнить, что результаты такого способа работы будут зависеть не только от конечной температуры, но и от скорости ее подъема.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Применения

Ценность толстослойных эмульсий для исследования космических лучей и ядерных реакций высокой энергии очевидна. Такие эмульсии удобны не только тем, что позволяют получить большое число следов на сравнительно малом участке поверхности, но и потому, что для измерений важно иметь максимальное число частиц, останавливающихся в эмульсии. Останавливающиеся в эмульсии мезоны с пробегом в несколько сантиметров представляют исключительную ценность для целей калибрования пластинок [8]. В случае частиц столь высокой энергии, что их пробег равен нескольким сантиметрам эмульсии, измерения энергии методом рассеяния могут быть произведены с достаточной точностью, если наблюдаемый след в эмульсии равен нескольким миллиметрам. Например, для частицы с энергией 10^9 эв для понижения уровня помех ниже истинного рассеяния необходимы длины ячеек счета 2500 μ , и поэтому для достижения точности в 20% след должен иметь длину 30 мм [9].

Применение толстослойных эмульсий и точных методов измерения помогло измерить и отчасти идентифицировать следы от звезд и изолированные частицы, создающие пары вторичных частиц высокой энергии [8—12].

Вне этих областей толстослойные эмульсии, повидимому, не применялись. Однако существует много проблем, в которых полезно получить трехмерную картину явления; именно такая картина создается в толстослойной эмульсии. Реакции под действием нейтронов в пластинках с наполнителями легче поддаются изучению, если за одно облучение регистрируются события на разных глубинах слоя. Благодаря накоплению продуктов расщепления лития и бора на различных глубинах становится возможным визуальное обнаружение линий в нейтронной спектрографии кристаллов.

При изучении удельных β -активностей пластинка может быть использована одновременно как ионизационная камера и как чувствительная эмульсия, поскольку электрон с энергией в 1 Мэв не может вылететь из эмульсии толщиной 1 мм. Регистрируя

рентгеновские линии в толстослойных пластинках, мы можем одновременно измерять интенсивность линии и ее поглощение в эмульсии. Этот вопрос исследован авторами еще весьма слабо, однако в качестве примера можно сослаться на предварительные опыты с рентгеновскими лучами с энергией от 15 до 30 кэв. На пластинке Кодак NT2b с толщиной слоя 200 μ фотографировали лауэграмму и пластинку равномерно проявляли по всей толщине. Точное значение энергии различных пятен не было известно, но в трех пятнах измерения были проведены, т. е. было определено среднее число зерен на 1 след фотоэлектрона и число следов в поле зрения на различных глубинах эмульсионного слоя. Таким образом можно было непосредственно наблюдать поглощение лучей и удалось установить, что максимальное поглощение соответствует минимальному числу зерен на след, т. е. минимальной энергии. Эти опыты указывают на возможность определения энергии рентгеновских лучей по их поглощению в эмульсии с одновременным измерением их интенсивности и коэффициента поглощения.

Рис. 7 демонстрирует видимое поглощение рентгеновской линии в эмульсии Ильфорд С2 толщиной 200 μ . Фотография 7, б была получена обычным способом с фокусировкой объектива на нижнюю часть эмульсии через самую эмульсию. Скопление изображений следов над этой точкой мешает отчетливому различению отдельных зерен. Фотография 7, в также получена с фокусировкой на нижнюю часть эмульсии, но с перевернутой пластинкой, т. е. через стекло. Здесь легко различить отдельные зерна. Этот способ позволяет сделать передержку в отдельных частях рентгенограммы, чтобы выявить наиболее слабые интенсивности и затем наблюдать детальную картину линий через перевернутую пластинку.

Для изучения этого вопроса необходим проявитель специального состава, чтобы избежать «всасывания» проявителя сильно экспонированными частями пластинки, которое привело бы к почернению даже в холодном растворе. Съемка может производиться на снятой или съемной эмульсии. Другой способ, который оказался полезным для решения некоторых других вопросов, состоит в пропитке пластинок холодным проявителем и облучении с «замороженным» проявителем при 0° или, если экспонирование весьма продолжительно, при —20°.

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Различение частиц

Существуют различные способы различения частиц, но все они подчинены одному общему условию: необходимости получить равномерную плотность зерен по всей глубине слоя. Получить

хорошее различие труднее в области малых скоростей частиц, где комкование зерен происходит с большей легкостью, чем в области слабой ионизации; возможность различения частично зависит от контроля допустимой степени физического проявления.

Существует несколько методов, которыми можно достигнуть различения:

1) использование специальных мелкодисперсных или малочувствительных эмульсий;

2) недопроявление путем разбавления, выбора проявителя, понижения температуры, понижения щелочности или сокращения времени проявления;

3) предварительная обработка пластинки путем регрессии, ускоренной регрессии, облучения при низкой температуре или в мокром виде;

4) последующая обработка пластинки путем ослабления или усиления.

Эти способы можно комбинировать один с другим, однако при этом всегда следует помнить, что все они должны сопровождаться равномерным проявлением по всей толщине слоя; ослабление и усиление должны проводиться таким образом, чтобы также быть равномерными. Этого можно достигнуть используя слабые растворы, вводимые в слой при низкой температуре и

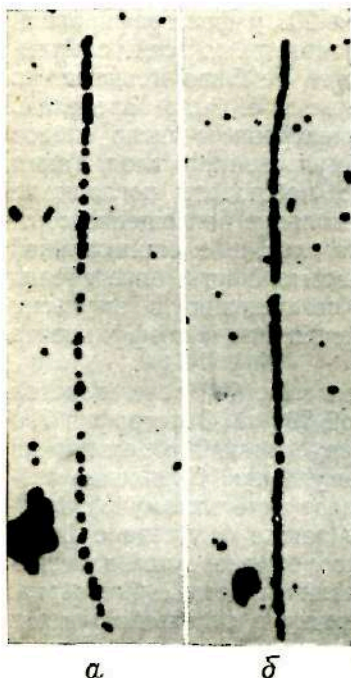


Рис. 8. Различение при помощи регрессии. Реакция ${}^7_3\text{Li}^2(n, \alpha){}_4\text{He}^3$.

а — после регрессии; б — до регрессии.

действующие только в стадии нагревания. Было найдено, что если использовать методы 2 и 3, то во многих случаях можно применять пластинки, чувствительные к мезонам и протонам (типов Ильфорд В и С), не прибегая к специальным пластинкам. То же самое относится к электроночувствительным пластинкам (Кодак NT4 и Ильфорд G5) с некоторым ущербом для регистрации следов частиц с малой удельной ионизацией.

На рис. 1 (стр. 115) показано различие между α -частицами урана и осколками деления урана в пластинках Ильфорд С2. Проявление производилось по рецептуре Стивенса [2] с использованием трех различных значений рН при постоянной температуре (19°).

При высоком pH осколки деления дают непрерывные следы, при низком pH уже можно сосчитать отдельные зерна, но при обоих значениях pH наблюдается сужение следов к их концу.

Рис. 8 демонстрирует различие между тритоном и α -частицей, достигнутое естественной регрессией [13, 14]. Пластинка была проявлена через месяц после облучения. Такие же результаты можно было получить, подвергая пластинку действию водяных паров или перекиси водорода в течение нескольких часов. Такое же различие может быть достигнуто, если использовать подходящий проявитель и соответствующую регулировку температуры на высокотемпературной стадии. Результат показан на рис. 2, который был получен с применением метола в качестве прояляющего вещества и с предварительной пропитывающей ванной из карбоната натрия для всех трех пластинок. Для получения разных степеней различения варьировали температуру высокотемпературной стадии проявления. Левый снимок соответствует недопроявлению при 20° и дает только наиболее сильно активированные зерна в приблизительно одинаковом количестве на каждый след. Центральный снимок демонстрирует различие при 22,5°. При такой температуре проявляются достаточно «мягкие» зерна, чтобы можно было выявить комкование только в следе α -частицы и к концу следа тритона. Правый снимок показывает результат полного проявления при 25°; теперь следы представляют непрерывную линию. На рис. 9 показана гистограмма распределения про-

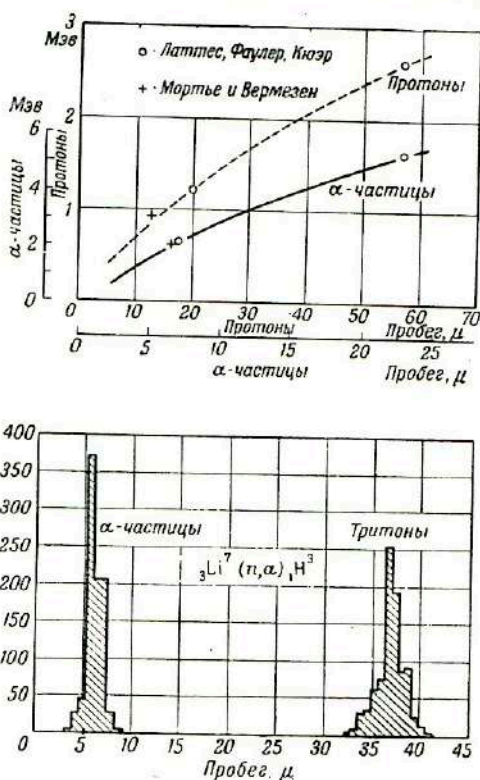
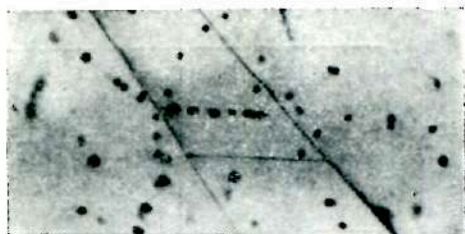


Рис. 9. Гистограмма [3], изображающая распределение пробегов тритонов и α -частиц от реакции расщепления ${}^7_3\text{Li}$ медленными нейтронами (внизу) и представление экспериментальных точек кривыми пробег — энергия [13] (вверху).

бегов, полученная для следов центральной пластинки, а также соответствие между опытными точками и кривой пробег — энергия Латтеса, Фаулера и Кюэра [13]. Аналогичные результаты можно получить, используя любое проявляющее вещество. Следует ожидать, что наиболее подходящим окажется мелкозернистый проявитель при правильно подобранной щелочности.



а



б

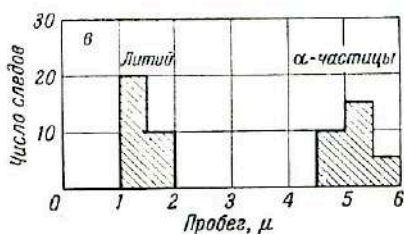


Рис. 10. Различение частиц из реакции $^{11}\text{B}^5$ (л, а) $^8\text{Li}^3$ с помощью метода облучения при низких температурах (Мелин).

а — при -60° ; б — при $+18^\circ$. в — гистограмма распределения пробегов, полученная по данным а.

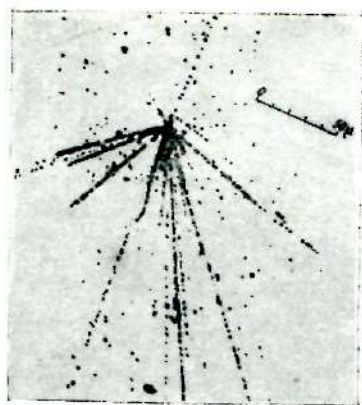
Рис. 10 демонстрирует различие частиц от реакции расщепления бора, достигнутое в результате применения метода облучения при низкой температуре и полного проявления. Обе пластинки были проявлены в нормальном амидоловом проявителе состава: 1 л дистиллированной воды, 25 г сульфита натрия (кристаллического) и 3 г амидола. Температура теплой стадии равнялась 22° . Пластинку а облучали при -60° , пластинку б — при нормальной температуре (около 18°). На рис. 10, в показана гистограмма распределения пробегов частиц для пластинки а.

На рис. 11 изображена звезда, сопровождаемая ливнем 31 релятивистской частицы, в эмульсии Кодак NT4 со слоем толщиной 400 м. Эта микрофотография не является мозаикой, а получена при помощи сухого объектива $40\times$.

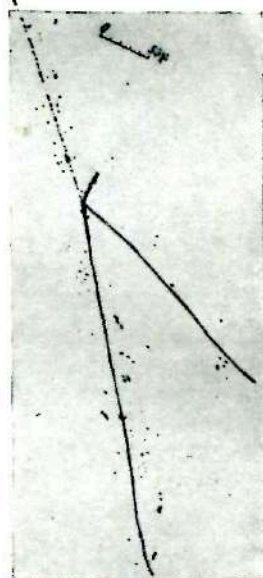
Эту пластинку обрабатывали следующим способом: 1) проявитель — 1 л дистиллированной воды, 18 г сульфита натрия (безводного), 8 мл 10%-ного раствора бромида калия, 4,5 г амидола; 2) обработка — предварительная пропитка в дистиллированной



Р и с. 11. Звезда с 31 лучом; пластинка Кодак NT4 со слоем 400 μ .
Снимок произведен при одной фокусировке при помощи сухого объектива 40 $\times$
(Козинс, Дилворс, Шенберг, Оккиаллини и Вермезен).



a



б

Рис. 12. Двойная звезда в эмульсии Ильфорд G5 толщиной 600 μ .

a — сквозь стеклянную подложку; *б* — сквозь поверхность эмульсии (репродукция получена с меньшим увеличением, чем в случае *a*). Расстояние между двумя звездами равно 600 μ .
(Козинс, Дилворс, Шенберг, Оккиалини и Вермезен).

воде в течение 100 мин.; погружение в проявитель при 5° на 100 мин., проявление в «сухом» виде при 26° в течение 40 мин.; останавливающий раствор при 5° (1%-ный раствор уксусной кислоты) в течение 100 мин., промывка и фиксирование.

На рис. 12 изображена двойная звезда в эмульсии Илфорд G5 толщиной 600 μ . Первичная звезда расположена на дне эмульсионного слоя; ее фотографировали через стеклянную подложку при помощи иммерсионного объектива Кука с большим предметным расстоянием и увеличением 45. Вторичная звезда находилась вблизи поверхности эмульсии, и съемка производилась через поверхность обычным способом.

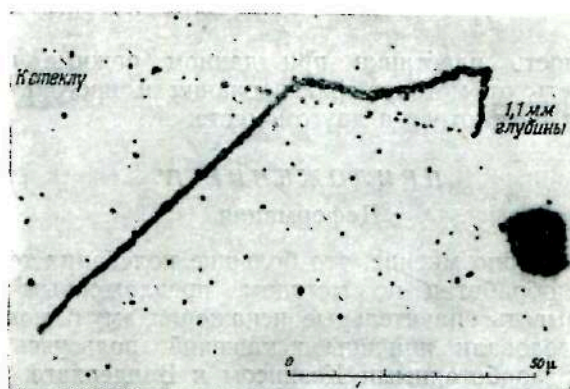


Рис. 13. Распад μ -мезона в эмульсии Илфорд G5 толщиной 1200 μ .

Эту пластинку проявляли следующим способом: 1) проявитель — 1 л дистиллированной воды, 35 г борной кислоты, 18 г сульфата натрия (безводного), 8 мл 10%-ного раствора бромистого калия, 4,5 г амидола; 2) обработка — предварительная пропитка в дистиллированной воде в течение 2,5 часа, проявление при 5° — 2,5 часа, проявление при 30° — 1 час; останавливающий раствор при 5° (0,2%-ный раствор уксусной кислоты) в течение 2,5 часа, промывка и фиксирование.

На рис. 13 показан распад μ -мезона на «дне» эмульсионного слоя толщиной 1200 μ (эмульсия Илфорд G5). Этот снимок представляет собой мозаику, полученную при помощи объектива Кука с большим предметным расстоянием и увеличением 45. Эту пластинку проявляли следующим способом: 1) проявитель — 1 л дистиллированной воды, 35 г фосфата калия, 18 г сульфата натрия (безводного), 8 мл 10%-ного раствора бромистого калия, 4,5 г амидола, 2 мл ветола*; 2) обработка — предварительная

* Смачивающий агент. — Прим. ред.

пропитка в дистиллированной воде в течение 5 час., погружение в проявитель при 5° на 5 час., проявление при 31° в течение 1 часа; останавливающий раствор при 5° (0,2%-ный раствор уксусной кислоты) — 5 час., промывка и фиксирование.

Приведенные здесь режимы проявления нельзя считать пригодными для всех пластинок одного типа. Одна партия пластинок никогда не бывает в точности тождественна другой, и пластинки одной и той же партии, но имеющие различную толщину, не всегда одинаково реагируют на проявление. Поэтому необходимо проводить контрольные испытания каждой партии пластинок такой же толщины, какая будет использована в работе (чтобы определить оптимальный состав проявителя и температуру теплой стадии).

Прозрачность пластинки при данном режиме проявления будет зависеть от методов фиксирования и просветления; этот вопрос будет рассмотрен в другом месте.

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

Деформация

Было высказано мнение, что большие колебания температуры в процессе обработки по методам, предложенным авторами, должны вызывать значительные искажения эмульсионного слоя. Авторы исследовали причины искажений, пользуясь методами измерения, разработанными Козинсом и Вандерхаге. Подробное описание полученных результатов будет дано в следующей статье. Эта работа показала, что основные причины деформации эмульсии лежат в обработке пластинки до и после проявления и что они маскируют искажения, возникающие при самом проявлении. Приведем два примера.

1. Напряжения, возникающие в эмульсии в процессе ее изготовления, могут служить причиной дальнейших искажений. Это удалось показать путем измерений, проведенных на двух сериях пластинок той же партии эмульсии. Одну серию высушивали в горизонтальном положении, другую — в вертикальном. Средний коэффициент искажения во втором случае был вдвое больше первого.

2. Весьма большое значение имеет способ сушки пластинок после обработки. В обычных методах сушки края пластинки высыхают первыми, что вызывает значительную деформацию поверхности эмульсии. Этот дефект может быть в значительной степени устранен, если окружить пластинку «защитным кольцом» мокрых желатиновых пластинок. В таких условиях края пластинки будут находиться почти в таких же гигроскопических условиях, как и ее центр, и высыхание будет происходить более равномерно по всей поверхности.

Прибегая к указанным предосторожностям, можно значительно уменьшить искажения толстых слоев. Так, например, в случае пластинок со слоем 600 μ , обработанных таким способом, полный угол кривизны, вызванной искажением следа длиной 1 см, не превосходил 2'.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dilworth C. S., Occhialini G. P. S., Payne R. M., *Nature*, **162**, 102 (1948).
2. Стивенс Г., Фотографический метод в ядерной физике, сб., Издательство, 1952, стр. 115.
3. Mortier M., Vermaesen L., *Bull. Centre phys. nucl., Bruxelles*, Note No 5 (Dec. 1948).
4. Пиччиото Е., Фотографический метод в ядерной физике, сб., Издательство, 1952, стр. 112.
5. Brown R., Camerini U., Fowler D. H., Muirhead H., Powell C. F., Ritson D. M., *Nature*, **163**, 8, 15 (1949).
6. Cosyns M. G. E., частное сообщение.
7. Bates W. J., Occhialini G. P. S., *Nature*, **161**, 473 (1948); *Dyson J., Proc. Phys. Soc.*, **B62**, 565 (1949).
8. Occhialini G. P. S., *Nuovo Cimento*, **6**, Suppl. 3, 413 (1949).
9. Goldschmidt-Clermont Y., *Bull. Centre phys. nucl., Bruxelles*, Note No 14 (Feb. 1950); *Nuovo Cim.*, **7**, 331 (1950).
10. Fowler D. H., *Phil. Mag.*, **41**, 169 (1950).
11. Cosyns M. G. E., *Nuovo Cim.*, **6**, Suppl. 3, 397 (1949).
12. Camerini U., Coor T., Davies J. H., Fowler P. H., Lock W. O., Muirhead H., Tobin N., *Phil. Mag.*, **40**, 1073 (1949).
13. Lattes C. M. G., Fowler D. H., Cüer P., *Proc. Phys. Soc.*, **59**, 896 (1947).
14. Faraggi H., *Compt. rend.*, **227**, 527 (1949); **229**, 1223 (1949).

13

Г. Стивенс

ПРИМЕНЕНИЕ БУФЕРНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ПРОЯВЛЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ПЛАСТИНОК

G. W. W. Stevens, *Photogr. Sensitiv.*, pp. 310—316.

В последние годы изготовлению специальных эмульсий для регистрации следов ионизирующих ядерных частиц уделялось большое внимание. Специфические свойства этих эмульсий могут быть использованы только при правильном проявлении, и специалистам по ядерной физике по необходимости приходится интересоваться поведением системы эмульсия — проявитель, представляющей одно неразрывное целое. В настоящее время общепризнано, что проявление ядерных эмульсий представляет самостоятельную проблему. В этой статье рассматриваются две стороны этого вопроса.

1. Изменение собственной чувствительности эмульсии при помощи контролируемого недопроявления.

2. Разработка проявителя для надежного проявления следов частиц с минимальной удельной ионизацией по всей толщине эмульсионных слоев пластинок Кодак NT4 со слоями 200 или 400 μ .

Оказалось, что решение поставленных задач требует регулирования pH проявителя, поэтому основной темой этого сообщения является применение буферных проявляющих растворов.

§ 1. Изменение собственной чувствительности эмульсии при помощи контролируемого недопроявления

Интерпретация ядерных реакций, зарегистрированных фотографической эмульсией, в значительной степени зависит от различий в плотности зерен и толщины следов частиц различной ионизирующей способности [1]. Логично полагать, что наибольшая чувствительность к изменениям ионизирующей способности может быть достигнута при выборе эмульсии, дающей «открытые» следы, в которых различимы отдельные зерна. В этом случае можно будет с большей легкостью замечать слабое увеличение или уменьшение плотности зерен в следах. Однако толщина следов зависит от условий фотографической обработки, и различные авторы пытались улучшить различение, изменяя время проявления и состав проявителя [2, 3] или же обрабатывая пластинки окисляющими растворами между облучением и проявлением [4]. Чувствительность эмульсий, используемых для регистрации следов ядерных частиц, изменяется в широких пределах: некоторые эмульсии регистрируют даже следы электронов, а наименее чувствительные эмульсии способны к регистрации только сильно ионизирующих осколков деления. В обычной практике принято проводить полное проявление любой из этих эмульсий с тем, чтобы использовать предельную чувствительность. Однако варьировать результаты проявления можно и путем недопроявления всех этих эмульсий, кроме наименее чувствительных. В настоящем разделе описаны некоторые опыты по методу недопроявления.

Общая методика эксперимента. Специальное недопроявление проводится таким образом, чтобы процесс проявления остановился еще до полного проявления всех облученных зерен. Это достигается либо уменьшением продолжительности проявления, либо применением сравнительно малоактивных проявителей. При неполном проявлении результаты весьма быстро изменяются с изменением условий проявления, поэтому контроль процесса проявления легче осуществить при длительном проявлении неак-

тивными проявителями. Толстослойные пластинки, использовавшиеся в этой работе, всегда требовали сравнительно большого времени проявления.

Описанные ниже испытания проводились при некоторой произвольно выбранной постоянной длительности проявления (40 мин.) и при 21°. Прежде всего приготавлился проявляющий раствор, обладающий достаточной активностью в указанных условиях (40 мин., 21°), а затем исходный рецепт изменялся таким образом, чтобы получить ряд растворов с понижающимся рН. Так, например, приготавливались следующие три запасных раствора:

Раствор А

п-Аминофенол солянокис-
лый 15 г
Бисульфит натрия 2,5 "
Вода до 0,1 л

Раствор Б

Фосфат натрия (трехзамес-
щенный кристаллический) . . 50 г *Na₂HPO₄*
Сульфит натрия (безводный) . 40 " *Na₂SO₃*
Бромид калия 4 " *KBr*
Вода до 1 л

Раствор В

Фосфат натрия (двузамещенный кри-
сталлический) 50 г *Na₂HPO₄*
Сульфит натрия (безводный) 40 " *Na₂SO₃*
Бромид калия 4 " *KBr*
Вода до 1 л

Растворы, забуференные до различных значений рН, можно было приготовить смешением различных количеств сильнощелочного раствора Б и менее щелочного раствора В. Таким способом изготовили серию проявителей с убывающими рН и активностью согласно следующей таблице:

Состав п-аминофеноловых проявителей

Раствор	Объем растворов, см ³		
	А	Б	В
1	2	50	50
2	2	30	70
3	2	25	75
4	2	20	80
5	2	14	86
6	2	10	90
7	2	5	95
8	2	—	100

В таких сериях проявителей наиболее активные растворы вызывали сильное проявление следов довольно слабо ионизирующих частиц типа протонов, в то время как наименее актив-

ные растворы проявляли только следы осколков деления. В некоторых случаях активность проявителя была уменьшена добавлением возрастающих количеств бромида калия при постоянном pH.

Опыты с эмульсиями NT2a. Вначале были исследованы возможности этого метода на пластинках Кодак NT2a, чувствительных к электронам с энергией до 50 кэв, к протонам с энергией 100 Мэв и к α -частицам любой энергии. Оказалось, что раствор 4 лишь весьма слабо проявлял следы α -частиц, а растворы 6—8 вообще не проявляли различимых следов. Однако и эти наименее активные растворы все еще энергично проявляли следы царапин на поверхности эмульсии.

Для исследования различения α -частиц и осколков деления проявляли пластинки NT2a со слоем 50 μ , находившиеся в контакте со слоем урановой соли. Одна серия (контрольная) пластинок, не подвергнутая дальнейшей обработке, позволяла наблюдать следы α -частиц. Другую серию пластинок экранировали свинцом толщиной 9,5 мм и облучали в контакте с урановой солью пучком нейтронов ($5 \cdot 10^{11}$ нейтронов на 1 см^2 поверхности пластинки) в ядерном реакторе в Харвелле. Таким образом, эта вторая серия пластинок облучалась осколками деления, α -частицами урана и γ -лучами из реактора, создававшими интенсивный фон. После проявления в течение 10 мин. в проявителе Кодак D-19b появились плотные следы α -частиц в первой серии пластинок (рис. 1). На пластинках, облученных в реакторе, оптическая плотность проявленного снимка значительно превышала 4,0, и наблюдение отдельных следов было невозможно. Если время проявления равнялось 1,25 мин., то на контрольных пластинках были видны следы α -частиц с почти таким же числом проявленных зерен меньшего размера (рис. 2), а на пластинках, облученных в реакторе, оптическая плотность достигала 1,0, и на фоне густого скопления зерен едва можно было различить отдельные следы (рис. 3). Раствор 4 проявлял на контрольной пластинке тонкие следы α -частиц (рис. 4), а на пластинках, облученных в реакторе, плотность достигала 0,6, и осколочные следы были легко различимы (рис. 5). Растворы 7 и 8 вообще не проявляли следов α -частиц, но осколочные следы были еще вполне различимы (рис. 6).

Аналогичное различение следов α -частиц и осколков деления было достигнуто при помощи серии проявителей, по составу подобных раствору 6, но с концентрациями бромида калия, изменяющимися от 0 до 8 г/л. Столь же хорошие результаты были получены также при использовании метоловых* растворов,

* См. приложение.

pH которых изменялся путем изменения относительных количеств сульфита и бисульфита. Менее четкое, но заметное различие достигалось при помощи серии проявителей, содержавших глицин или гидрохинон.

Было замечено, что результаты, полученные при проявлении в растворах с уменьшавшимися значениями pH, сильно зависели от природы проявляющего вещества. В случае p-аминофенола и метола следы α -частиц с падением pH вначале ослабевали, причем это происходило скорее в результате уменьшения числа проявленных зерен, а не уменьшения размеров проявленной частицы серебра. Напротив, в случае гидрохинона и глицина следы ослабевали с падением pH в результате уменьшения размеров частиц, а уменьшения числа проявленных зерен не было обнаружено с достаточной надежностью.

В других опытах автор статьи подтвердил результаты Перфилова [4], который обнаружил, что обработка пластинок до проявления разбавленным раствором хромовой кислоты уменьшает проявляемость следов α -частиц сильнее, чем осколочных следов. Достигнутое в результате такой обработки различие следов близко к различению по методу недопроявления пластинок без дополнительной обработки.

Попытки улучшить различение α -частиц и протонов в эмульсии NT2a путем недопроявления оказались почти совершенно безуспешными. Следы α -частиц, в зависимости от степени недопроявления, могли быть проявлены как в виде тонких цепочек зерен, так и в виде толстых сплошных линий, однако это не давало какого-либо заметного улучшения в различении.

Испытания других эмульсий. Автор исследовал влияние недопроявления на различение осколочных следов и следов α -частиц в других эмульсиях. Избирательное ослабление α -следов наблюдалось в пластинках Ильфорд D1 и E в пластинках Кодак NT1, однако эффект был слабее, чем в пластинках NT2. С другой стороны, в случае пластинок Кодак NT4 и Ильфорд G5, чувствительных к частицам с минимальной ионизацией, различение было незначительно.

§ 2. Проявление следов частиц минимальной ионизирующей способности в толстослойных пластинках NT4

В последние годы для исследования ядерных расщеплений начали применяться весьма толстые эмульсионные слои, которые могут быть эффективно использованы только при условии равномерного проявления всей толщины слоя, т. е. тогда, когда следы любой частицы имеют одинаковую структуру на любой глубине слоя. Широкое применение нашел следующий метод обработки пластинок [5]. Пластинки пропитывают в охлажденном льдом

проявителе и после окончания пропитки нагревают до комнатной температуры. Так как при низкой температуре проявление почти полностью прекращается, то весь процесс фактически разделяется на две стадии — стадию пропитки и стадию проявления. Достоинства этого метода были подтверждены другими авторами [6], которые рекомендовали пропитывать пластинки Истмэн NTB в разбавленном проявителе D-19 при низких температурах и снова разбавлять проявитель в стадии подогрева, т. е. в стадии собственно проявления.

При появлении пластинок Кодак NT4, чувствительных к частицам с минимальной удельной ионизацией, потребовалось уделять еще больше внимания методике проявления. Хотя эти пластинки определенно способны регистрировать следы частиц с минимальной ионизирующей способностью, но в оптимальных условиях проявляется только около 20% эмульсионных микрокристаллов, лежащих на пути частицы. В случае недопроявления плотность зерен в следах таких частиц оказывается слишком малой, и различение невозможно, а при энергичном проявлении следы затемняются вуалью. Поэтому, для того чтобы рассмотреть следы, идущие через всю толщину эмульсионного слоя, необходимо, чтобы степень проявления всех глубин слоя лежала между двумя указанными пределами. Таким образом, проявление толстослойных эмульсий является весьма тонкой операцией.

Влияние различных условий обработки исследовалось автором на эмульсиях NT4 с толщиной слоя 200 μ . Наилучшие результаты были получены по методу температурного цикла с использованием амидолового проявителя [7]. Отдельные прямые линейные следы частиц минимальной ионизирующей способности были различимы по всей толщине слоя в 200 μ . Менее благоприятные результаты были получены по методу Вильсона и Ванзелова [6] или при двухрастворном проявлении [8] (предварительная пропитка проявителем с низким pH с последующей обработкой аналогичным раствором, но с повышенным pH). Эти два метода проявления позволяют получить следы частиц минимальной ионизирующей способности на поверхности эмульсии, но в нижних слоях следы не проявляются. Увеличение времени проявления вызывало быстрое возрастание вуали и пятен еще задолго до удовлетворительного проявления нижних слоев эмульсии. Амидоловый проявитель давал отличные следы, но результаты проявления были недостаточно воспроизводимы. Такие химические свойства этого проявляющего раствора, как слабая буферная способность и недостаточная устойчивость самого амидола, также несовместимы с требуемым постоянством результатов.

В связи с этим автор пытался разработать проявитель, дающий более воспроизводимые результаты и такую же равномер-

ность следов частиц минимальной ионизации, как амидоловый проявитель. Для этих опытов был выбран метол, который широко применяется в фотографии и легко доступен в виде весьма чистого продукта. Проявляющие растворы приготавливали путем добавления метола и сульфита натрия к буферному раствору, содержащему равные весовые количества карбоната и бикарбоната натрия. Оба эти компонента буферного раствора также легко доступны в чистом виде, и полученный раствор обладает хорошей буферной емкостью, т. е. сопротивляемостью к случайным изменениям pH. Проявители требуемой активности содержали 1,5 г метола в 1 л рабочего проявителя в отсутствие бромида калия. Для приготовления проявляющего раствора использовался кристаллический сульфит натрия. Внешний вид этой соли позволяет судить о ее качестве; сульфит натрия доступен в виде аналитически чистого реактива. Кроме указанного проявителя, был использован другой *, содержащий 20 г метола на 1 л; предполагалось, что такой раствор ускорит создание требуемой рабочей концентрации в нижних слоях эмульсии. Однако этот раствор не дал лучших результатов: помимо повышенного расхода метола, буферная способность его была ниже, чем у раствора с низкой концентрацией метола.

Проявитель с малым содержанием метола удовлетворительно проявлял следы частиц минимальной ионизирующей способности. Пластинки со слоем 200 μ можно было проявить до самого основания слоя, так что отдельные следы частиц минимальной ионизирующей способности были видны по всей длине до самых глубоких слоев эмульсии. Это достигалось при следующем режиме обработки: предварительное пропитывание проявителем в течение полчаса при 5° и проявление при комнатной температуре в продолжение 1 часа. Плотность зерен в этих следах в нижних слоях эмульсии существенно не отличалась от плотности в поверхности эмульсии. Удовлетворительное проявление пластинок со слоем 400 μ могло быть достигнуто удлинением предварительной пропитки до 4 или даже 6 час.

Берримэн пользовался этим же проявителем для текущего контроля пластинок NT4 и получил хорошую воспроизводимость результатов.

Ниже приводятся практические указания по проявлению толстослойных пластинок NT4.

Рецепт запасного раствора А

Сульфит натрия («чистый для анализа», кристаллический)	25 г
Метол (Кодак, проверен химически)	3 „
Вода	до 1 л

* См. приложение.

Для приготовления этого раствора можно пользоваться только метолом, хранившимся в хороших условиях и почти бесцветным. Наилучшая воспроизводимость достигается при изготовлении раствора в день работы с ним.

Рецепт запасного раствора В

Карбонат натрия («чистый для анализа», безводный) . . .	50 г
Бикарбонат натрия («чистый для анализа», безводный) . . .	50 „
Вода	до 1 л

Проявление пластинок толщиной 200 μ . Смешивают равные объемы запасных растворов А и В и охлаждают сосуд льдом, пока температура раствора не упадет до 5° или ниже. Пропитывают пластинки в течение 30 мин. при низкой температуре, нагревают раствор до 21° в течение 5—10 мин. и поддерживают эту температуру 15—30 мин. Желательно провести пробное проявление каждой партии пластинок. Некоторые из них могут потребовать более короткого времени проявления, в то время как другие, особенно чистые эмульсии, могут быть успешно проявлены в течение 80 мин.

Проявление пластинок толщиной 400 μ . Только что описанный режим проявления определенно приводит к недопроявлению пластинок толщиной 400 μ . Достаточно равномерное проявление таких весьма толстослойных эмульсий было достигнуто путем увеличения времени предварительной пропитки до 4—6 час. при температуре между 0 и 2°. В опытах автора проявитель находился в глубоком сосуде, например в химическом стакане, окруженном тающим льдом, так что температура поддерживалась близко к точке замерзания.

§ 3. Обсуждение результатов

Пиччиотто [9] указал, что регулирование рН при проявлении ядерных пластинок можно осуществить как путем создания соответствующего рН эмульсии до проявления, так и подбором рН самого проявителя. Интересно выяснить, в какой степени метод подбора рН проявителя или эмульсии может быть эффективно использован для ядернофизических исследований. Пример успешного использования электроночувствительных пластинок для избирательного проявления осколочных следов может на первый взгляд выглядеть как указание на то, что изменением режима обработки одной и той же эмульсии можно получить весь требуемый интервал чувствительностей. Однако такой вывод опровергается невозможностью улучшить различение α -частиц и протонов на пластинках NT2a. Из этого можно заключить, что воз-

возможность различения двух данных видов частиц является скорее специфическим свойством самой эмульсии. Тем не менее различение может быть улучшено правильным подбором режима проявления. Такое представление объясняет различную степень различения следов α -частиц и осколочных следов в различных эмульсиях.

Таким образом, контролируемое недопроявление является вспомогательным методом улучшения или изменения различения, которое играет подчиненную роль сравнительно с различением, достигаемым правильным подбором типа эмульсии. Тем не менее метод недопроявления может оказаться ценным средством для получения промежуточных степеней различения, лежащих между различениями, достигаемыми посредством применения различных существующих видов эмульсий. В тех случаях, когда свойства эмульсии непредвиденно меняются в результате необычных атмосферных условий или пропитки, весьма полезно иметь в своем распоряжении набор проявляющих растворов, которые могут быть приготовлены всего из трех запасных растворов. В этом случае можно опытным путем добиться хороших результатов, даже когда первые пробные проявления дают плотную вуаль или вообще не дают изображения.

Повидимому, область полезных изменений степени различения может быть связана с теми изменениями в следах α -частиц, которые вызываются понижением pH проявителя. Проявление мелко-дисперсных эмульсий типа NT2a, повидимому, протекает в две стадии. Сначала происходит быстрое восстановление облученных микрокристаллов бромистого серебра до металлического серебра (химическое проявление). Далее эти частицы увеличиваются в размере механизмом физического проявления за счет частичного растворения в проявителе не облученных микрокристаллов. Конечная масса частиц серебра значительно превышает массу исходных микрокристаллов. Эти две стадии в случае использования различных проявляющих веществ могут по-разному зависеть от уменьшения pH. Если свойства проявителя таковы, что при уменьшении pH вначале ослабляется физическое проявление, то это приведет лишь к уменьшению размера серебряных частиц, но число их вначале не будет уменьшаться. Однако лишь первая стадия проявления зависит от свойств скрытого изображения, и изменения условий на второй стадии едва ли могут привести к улучшению различения. Это имеет место в случае гидрохинона или глицина, когда уменьшение pH оказывает влияние, аналогичное уменьшению времени проявления.

Если же при уменьшении pH первым ослабляется химическое проявление, то будет проявлено меньшее число эмульсионных микрокристаллов, но те из них, которые будут проявлены химически, далее будут расти за счет физического проявления.

Прежде всего будут проявляться микрокристаллы, несущие наибольшие центры скрытого изображения, и поэтому результаты проявления будут аналогичны тем, которые получаются на менее чувствительных эмульсиях. В этих условиях различение улучшится. Этот случай, повидимому, соответствует *п*-аминофеноловому и метоловому проявителям.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Набор проявителей на основе метола

Запасной раствор А

Метол	75 г
Сульфит натрия (безводный)	100 "
Вода	до 0,8 л

Запасной раствор Б

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ Метабисульфит натрия	80 г
Вода	до 0,2 л

Для приготовления рабочих растворов различные объемы раствора Б добавляют к 200 мл раствора А. При добавлении 12 мл раствора Б осколочные следы были весьма плотны, а α -следы весьма слабы. При добавлении 35 мл раствора Б осколочные следы были едва заметны.

Другой метоловый проявитель для пластинок NT4

Метол	20 г
Сульфит натрия (безводный)	10 "
Бура	40 "
Борная кислота	10 "
Вода	до 1 л

ЛИТЕРАТУРА

1. Поуэлл, Оккиалини, УФН, **85**, 213, 384 (1948).
2. Powell C. F., Occhialini G. P. S., Livesey D. L., Chilton L. V., J. Sci. Instr., **23**, 102 (1944).
3. Демерс П., Фотографический метод в ядерной физике, сб., Издательство, 1952, статьи 4, 5, 6.
4. Перфилов Н. А., ДАН СССР, **42**, 258 (1944).
5. Dilworth C. C., Occhialini G. P. S., Payne P. M., Nature, **162**, 102 (1948).
6. Wilson M. J., Vanselow W., Phys. Rev., **75**, 1144 (1949).
7. Dilworth C. C., Occhialini G. P. S., частное сообщение.
8. Blau M., de Felice J. A., Phys. Rev., **74**, 1198 (1948).
9. Picciotto E., Bull. Centre phys. nucl., Bruxelles, Note № 4 (1948).



Рис. 1. Следы α -частиц.

Проявление: 10 мин. в D-195. Эта и следующие микрофотографии сняты при увеличении 1250 и уменьшены до 4/7 при печати.



Рис. 2. Ослабленные следы α -частиц после пребывания в течение 1 мин. 15 сек. в D-19b.

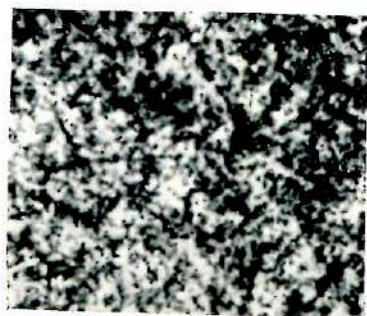


Рис. 3. Пластины, облученные в ядерном реакторе и проявленные в продолжение 1 мин. 15 сек. в D-19b.



Рис. 4. Ослабленные α -следы, проявленные раствором 4 в течение 40 мин.

Можно видеть, что уменьшилось только число, но не размер проявляемых зерен.

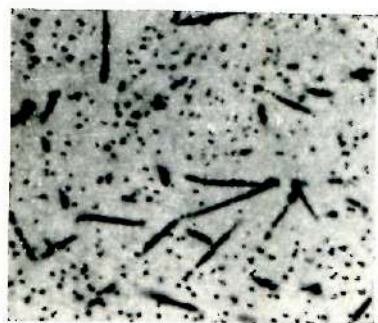


Рис. 5. Пластина, облученная в ядерном реакторе и проявленная за 40 мин. в растворе 4.

Отчетливо видны следы осколков деления, входящих в эмульсию.



Рис. 6. Осколочные следы, проявленные раствором 7, который совершенно не способен проявлять следы α -частиц.

14

*А. Герц*ПРОЯВЛЕНИЕ ЭМУЛЬСИИ ИЛЬФОРД G5
ПРОЯВИТЕЛЕМ ID-19

A. J. Herz, J. Sci. Instr., 29, No 1, 15—18 (1952).

§ 1. Введение

Одним из первых проявителей, рекомендованных для обработки ядерных эмульсий Ильфторд, был разбавленный проявитель типа ID-19 [1]. Он широко применяется еще и в настоящее время для обработки «тонких» эмульсий, т. е. эмульсий толщиной до 200 μ . Простейшим методом проявления, в котором этот проявитель дает хорошие результаты, является, повидимому, оригинальный вариант температурного цикла [2]. Этот метод не требует специального оборудования, если пластинки оставляются в проявителе на время теплой стадии проявления; применение его не вызывает каких-либо осложнений при работе с эмульсиями толщиной примерно до 200 μ .

Поэтому представляется целесообразным произвести экспериментальное исследование характеристик этого проявителя и метода проявления. К сожалению, плотность зерен, полученная в тождественных условиях обработки, слегка колеблется для эмульсий и различных варок. Иногда наблюдаются колебания в пределах одной и той же варки, но они редки. Поэтому результаты, полученные при определении плотности зерен, дают скорее порядок величин, а не точные данные.

§ 2. Экспериментальная часть

Во избежание излишней экспериментальной работы была исследована только эмульсия G5 толщиной 200 μ из одной варки (с одним исключением, см. § 4). Продолжительность холодной стадии температурного цикла составляла 1 час, и пластинки оставались в проявителе на время теплой стадии.

Определялись следующие величины: 1) зависимость плотности зерен вуали от продолжительности и температуры теплой стадии; 2) образование вуали в холодной стадии; 3) зависимость плотности зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности от продолжительности и температуры теплой стадии; 4) глубина, на которую распространяется полное проявление после нагревания проявителя, как функция длительности пропитки при низкой температуре.

§ 3. Метод проявления

В качестве проявителя использовался ID-19 по инструкции фирмы Ильфорт [1], разбавленный в 3 раза. Режим обработки приведен в следующей таблице:

Обработка	Температура, °C	Длительность, мин.
Пропитка в дистиллированной воде	5	60
Пропитка в проявителе	5	60
Нагревание пластинок в проявителе и выдерживание	0	t
Останавливающий раствор (5% $K_2S_2O_8$)	18, с понижением до 5	60
Фиксирование, промывка и сушка — обычным способом. $\theta = 14, 16, 18, 20$ и 22° $t = 0, 10, 20, 30, 40$ и 50 мин.		

При всех температурах θ теплой стадии пластинки проявлялись одновременно. Пластины, для которых $t = 0$, извлекались из холодного проявителя до его подогревания. Так как имеющиеся данные [3, 4] указывают на высокий температурный коэффициент проявления, то температура теплой стадии регулировалась с точностью до $0,1^\circ$. Раствор непрерывно циркулировал над пластинками.

§ 4. Зависимость плотности вуали от времени и температуры

Зерна вуали подсчитывались при большом увеличении при помощи квадратной окулярной сетки. Для этого производилось весьма медленное перемещение тонкого фокусирующего устройства микроскопа и подсчитывалось каждое попадающее в фокус зерно. Зерна, принадлежащие следам, не считывались. Каждой точке на графиках отвечает около 500 сосчитанных зерен, и среднее квадратичное отклонение, обусловленное статистическим колебанием числа зерен в единице объема, составляет 4,5%. Результаты показаны на рис. 1.

Распределение точек на рис. 1 определенно показывает, что плотность зерен вуали приблизительно линейно возрастает с температурой (по крайней мере в рассмотренном интервале), хотя разброс точек значительно больше ожидаемого из одних только статистических соображений. Поэтому через точки были проведены прямые линии, из которых были взяты интерполированные

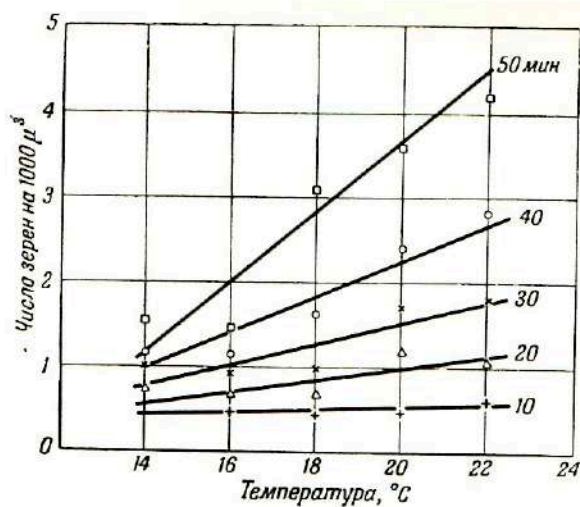


Рис. 1. Зависимость плотности зерен вуали от температуры теплой стадии проявления при различном времени проявления.

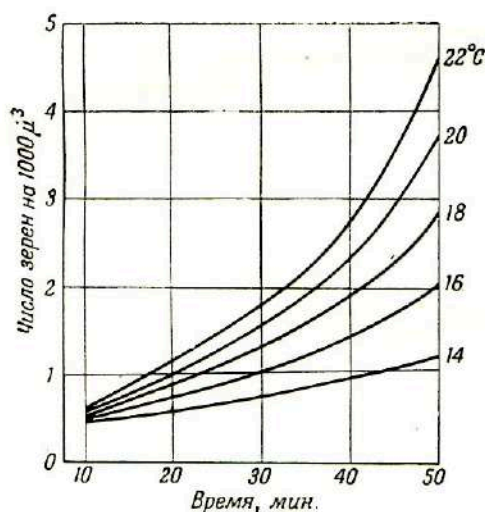


Рис. 2. Идеализированные кривые плотности зерен вуали как функции продолжительности теплой стадии.

точки для построения идеализированного семейства кривых на рис. 2.

Плотность зерен вуали, созданной только во время холодной стадии проявления, представлена графически на рис. 3. К сожа-

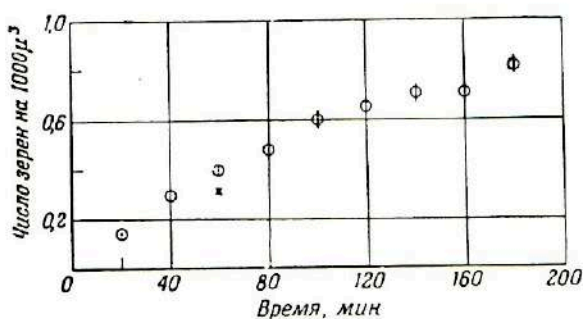


Рис. 3. Вуаль, возникающая при проявлении на холоду.

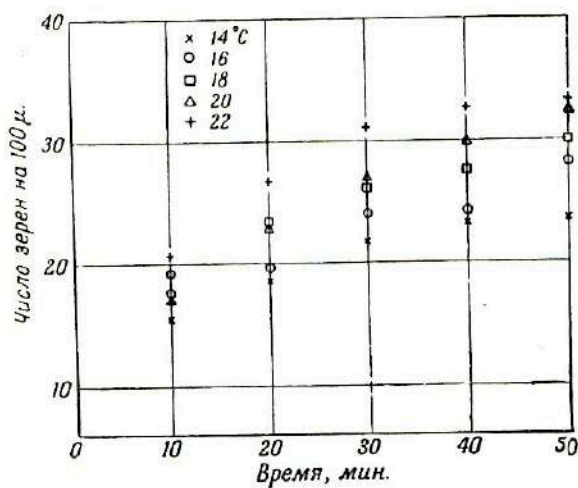
Ф — средняя температура $3,6^\circ$, Х — средняя температура 5° , эмульсия та же, что в других опытах. Вертикальные черточки показывают средние квадратичные отклонения.

лению, для этих опытов пришлось использовать эмульсию из другой варки, и температура была несколько ниже обычной.

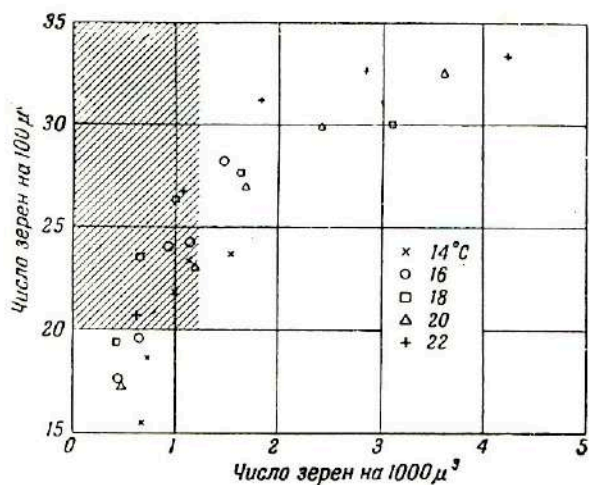
§ 5. Плотности зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности

При определении плотности зерен, соответствующей минимальной ионизации, автор использовал хорошо известный факт, что из числа следов быстрых частиц, созданных на уровне моря, большинство обусловлено μ -мезонами с энергиями, значительно превосходящими энергию, необходимую для минимальной ионизации. Поэтому, если ограничиться счетом только тех следов, которые имеют вид следов частиц минимальной ионизации, то средняя плотность зерен для этих следов будет лишь слегка превышать истинную плотность, отвечающую минимуму ионизации, или даже равна ей. Каждое из приведенных здесь значений минимальной плотности зерен получено в результате счета зерен в 15 различных следах, и среднее квадратичное отклонение отдельного значения составляет менее 5% (рис. 4). Другие авторы* нашли, что между плотностью зерен вуали и плотностью зерен в следах частиц минимальной ионизации существует тесная связь. Рис. 5 показывает, что такая связь действительно имеется, но точки обнаруживают довольно большой разброс.

* См. статью 6, стр. 87.



Р и с. 4. Зависимость плотности зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности от продолжительности теплой стадии проявления.



Р и с. 5. Зависимость плотности зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности от плотности вуали.

Область, пригодная для практической работы, указана косой штриховкой.

Температурный коэффициент минимальной плотности зерен может быть грубо определен из рис. 4. Он имеет порядок 1 зерна на 100 μ на 1°, т. е. около 5% на 1°. В пластинках, проявленных только в холодном проявителе, нельзя было надежно идентифицировать следы частиц минимальной ионизации.

§ 6. Диффузия проявителя в эмульсию

Для равномерного проявления эмульсионных слоев толще 100 μ применяются специальные методы, так как для того, чтобы свежий проявитель достиг нижних слоев эмульсии, требуется

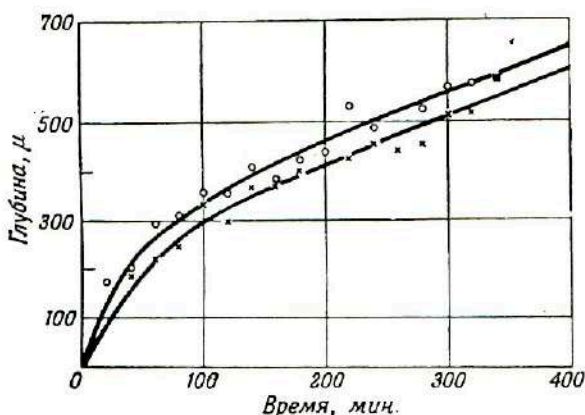


Рис. 6. Зависимость глубины проникновения проявителя от времени при 5°.

х — без предварительной пропитки в воде, О — с предварительной пропиткой. Среднее квадратичное отклонение для каждой точки $\pm 33 \mu$.

определенное время. Обычным методом проявления в этих случаях служит метод температурного цикла [2], в котором активность проявителя в стадии пропитки снижается путем понижения температуры. Для оценки возможностей этого метода проявления необходимо было располагать двумя рядами данных: 1) зависимостью степени проявления холодным раствором от времени проявления и 2) зависимостью глубины, на которой происходит полное проявление, от времени. Наиболее подходящим критерием степени проявления является, повидимому, плотность зерен вуали* (см. также § 5). Для этой цели можно использовать результаты, показанные на рис. 3 и 5.

Для определения глубины, до которой доходит полное проявление при нагревании эмульсии, использовался следующий

* См. статью 6, стр. 87.

метод. Небольшие пробные пластинки с толщиной эмульсии $1\ 000\ \mu$ пропитывали при 5° требуемое время. Затем пластинки извлекали из проявителя и эмульсию надрезали. Свеженадрезанную поверхность немедленно освещали белым светом, и те части эмульсии, в которые проник проявитель, чернели через несколько секунд. Граница между черным и белым участками была достаточно резка, чтобы ее можно было фиксировать на точке пересечения нитей микроскопа. Следовательно, изменение активности в направлении, перпендикулярном к границе, должно быть весьма резким, и разумно допустить, что линия раздела между полным и частичным проявлением проходила весьма близко к границе между черным и белым участками. Такие измерения проводились как на эмульсии, предварительно пропитанной холодной дистиллированной водой в течение 2 час., так и на эмульсии без предварительной пропитки. Полученные результаты (рис. 6) показывают, что пропитка пластинок в воде представляет определенные преимущества. Наши результаты не согласуются с данными, приведенными в другой работе [5], однако сравнение затрудняется различиями в условиях опыта.

§ 7. Обсуждение результатов и выводы

Обычно требуется, чтобы следы частиц минимальной ионизирующей способности были легко различимы даже при весьма значительном рассеянии. Было найдено, что это требование выполняется, если плотность зерен вуали меньше 1,3 зерен на $1\ 000\ \mu^3$ и минимальная плотность зерен в следах больше 20 зерен на $100\ \mu$. Из рис. 5 видно, что хорошие результаты могут быть получены в широком интервале температур теплой стадии проявления.

Скорость проявления в холодной стадии значительна, и это кладет предел увеличению той толщины эмульсии, которая еще может быть равномерно проявлена разбавленным в 3 раза проявителем ID-19. Плотность вуали, создаваемая в теплой стадии, имеет порядок 0,5 зерен на $1000\ \mu^3$ или даже более; поэтому максимально допустимая плотность вуали, возникающая в холодной стадии, будет около 0,4 зерен на $1\ 000\ \mu^3$. С небольшим запасом это составит около 0,5 зерен на $1\ 000\ \mu^3$. Из рис. 3 следует, что продолжительность холодной стадии не должна превышать примерно 1 часа. Следовательно, наибольшая толщина эмульсионного слоя, которая может быть успешно проявлена, составляет около $250\ \mu$.

Приведенные здесь данные относятся к одной варке эмульсии; другие варки могут дать немного большую вуаль. Учитывая это обстоятельство, можно полагать, что разбавленный в 3 раза проявитель ID-19 не является надежным проявителем для эмульсий

толще 200 μ . Напротив, для «тонких» эмульсий он вполне надежен и не требует сложной методики и специальной аппаратуры, если только не претендовать на высокую степень воспроизводимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фирма Ильфорд, инструкции (Ilford Data Sheet).
2. Dilworth C. C., Occhialini G. P. S., Payne R. M., *Nature*, **162**, 102 (1948).
3. Mortier M., Vermaesen L., *Bull. Centre phys. nucl. l'Univ. libre, Bruxelles*, note № 5 (1948).
4. Dilworth C. C., Occhialini G. P. S., Vermaesen L., *Bull. Centre phys. nucl. l'Univ. libre, Bruxelles*, № 13a (1950).
5. Dainton A. D., Gattiker A. R., Lock W. O., *Phil. Mag.*, **42**, 396 (1951).

15

А. Герц

ПРОЯВЛЕНИЕ ТОЛСТОСЛОЙНЫХ ЯДЕРНЫХ ЭМУЛЬСИИ АМИДОЛ-БИСУЛЬФИТНЫМ ПРОЯВИТЕЛЕМ

A. J. Herz, *J. Sci. Instr.*, **29**, No 2, 60—61 (1952).

В прошлой работе автора * были рассмотрены свойства проявителя ID-19, существенные для проявления эмульсии Ильфорд G5, и описана методика эксперимента. Аналогичные методы были использованы автором для исследования свойств амидол-бисульфитного проявителя, рекомендованного другими исследователями [1]. Рецепт проявителя приведен ниже; он содержит больше бисульфита натрия, чем проявитель, предложенный в цитированной работе [1]. Это было сделано с целью повышения его устойчивости к влияниям, изменяющим pH.

Рецепт проявителя

Сульфит натрия (кристаллический)	15 г
Бисульфит натрия (раствор уд. вес 1.34)	14 мл
Амидол	3 г
Дистиллированная вода	до 1 000 мл

Было проведено две серии опытов. В первой серии пластинки проявлялись по стандартной методике температурного цикла [2, 3], чтобы выяснить, в какой мере результаты проявления зависят от продолжительности и температуры теплой стадии. Во второй серии опытов исследовались скорость диффузии проявителя и

* См. статью 14, стр. 145.

скорость проявления в холодной стадии. Режим проявления в первой серии опытов приведен ниже, а результаты показаны на рис. 1.

Режим обработки

1. Пропитка в дистиллированной воде при 5° , в течение 2 час.
2. Холодная стадия: пропитка в проявителе при 5° , в течение 2 час., с перемешиванием
3. Теплая стадия: осушение поверхности пластинок фильтровальной бумагой и нагревание сухих пластинок до θ° , в течение t мин.:

$$\theta^\circ = 21, 24, 27, 30, 33^\circ \text{C}$$

$$t = 0, 10, 20, 30, 40, 50 \text{ мин.}$$

4. Охлаждение пластинок (сухих) до 5° в течение примерно 10 мин.
5. Останавливающий раствор, фиксирование, промывка, очистка приблизительно при 5°

Во второй серии опытов пластинки проявлялись различное время в холодном проявителе без теплой стадии. Результаты,

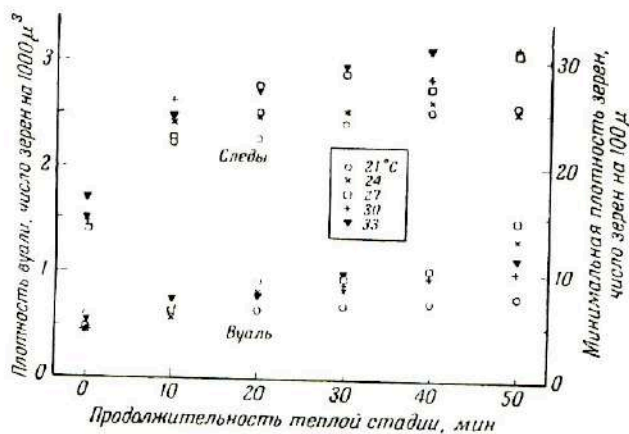


Рис. 1. Зависимость плотности зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности и плотности зерен вуали от продолжительности и температуры теплой стадии проявления.

показанные на рис. 2, говорят о том, что даже при 5° происходит энергичное проявление. Глубина проникновения проявителя в холодной стадии показана на рис. 3; там же для сравнения изображена кривая проникновения проявителя ID-19. Можно видеть, что в первые два часа пропитки скорость диффузии амидолбисульфитного проявителя значительно превосходит скорость диффузии ID-19, что и является главной причиной большей

пригодности амидол-бисульфитного проявителя для проявления толстослойных эмульсий. Теперь мы можем определить наибольшую толщину эмульсии, которая может быть проявлена равномерно. Опыты показали, что проявление равномерно, пока плотность вуали, возникающей в верхних слоях эмульсии до того момента, когда проявитель проникает до основания эмульсии, лежит ниже 0,4—0,5 зерен на $1\ 000\ \mu^3$. Исходя из этой цифры и рис. 2 и 3,

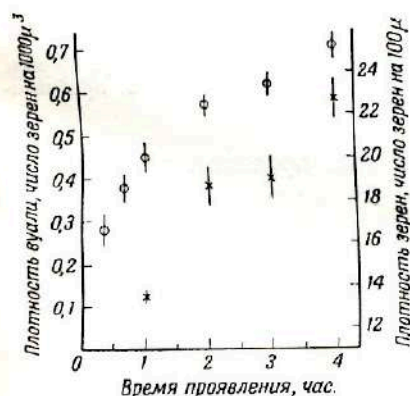


Рис. 2. Плотность зерен вуали (О) и следов частиц минимальной ионизирующей способности (X) после проявления при низкой температуре.

Вертикальные черточки показывают средние квадратичные отклонения.

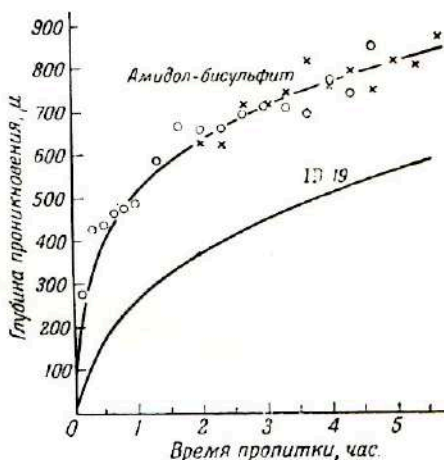


Рис. 3. Глубина проникновения проявителя, выраженная через толщину сухой необработанной эмульсии.

Эмульсии предварительно пропитывали водой. Проявитель перемешивали. Знаками О и X обозначены результаты двух независимых опытов.

можно найти, что амидол-бисульфитный проявитель пригоден для проявления эмульсий толщиной до $500\text{--}600\ \mu$ при пропитке в течение 2 час. Следует отметить, что длительность пропитки эмульсий толщиной $400\ \mu$ равна всего 30 мин.

Остается рассмотреть качество проявленного изображения. Оно будет зависеть не только от величины вуали по сравнению с минимальной плотностью зерен в следах, но и от загрязнения, создаваемого коллоидным серебром, выпадающим в эмульсии при проявлении. Для удаления этих загрязнений можно использовать ряд методов [4, 5*]. Автор применил метод пропитки эмульсии (после фиксирования и промывки) в 0,06%-ном растворе феррицианида калия с последующим непродолжительным фиксированием и промывкой. (Этот метод связан с довольно

* См. также статью 14, стр. 145.

энергичным окислением, и его следует применять с осторожностью.)

Связь между плотностью зерен и различимостью следов была исследована Берримэном * и Коутсом **. На рис. 4 графически представлена зависимость минимальной плотности зерен от соответствующей плотности вуали, а также граница между областями хорошей и плохой различимости (взята из работ Берримэна и Коутса). На график нанесены также данные для ID-19, чтобы показать преимущества амидол-бисульфитного проявителя.

Из рис. 4 видно, что при равной вуали более высокая плотность зерен в следах частиц минимальной ионизации может быть получена с применением тепловой стадии, а не без нее. Равномерность проявления может быть достигнута и при одной температуре, если время, необходимое для диффузии проявителя в слой, мало по сравнению с полным временем проявления. Это служит подтверждением целесообразности применения метода температурного цикла.

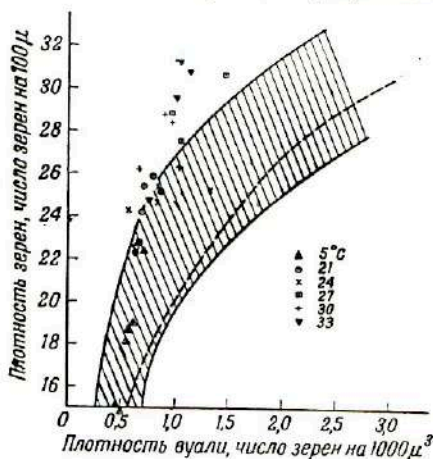


Рис. 4. Зависимость плотности зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности от плотности зерен вуали.

Область результатов, полученных с ID-19, показана стриховкой. Граница между «хорошим» и «плохим» различием проведена на основании данных из работ Берримэна и Коутса и обозначена стриховой линией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dainton A. D., Gattiker A. R., Lock W. O., *Phil. Mag.*, **42**, 396 (1951).
2. Dilworth C. C., Occhialini G. P. S., Payne R. M., *Nature*, **162**, 102 (1948).
3. Dilworth C. C., Occhialini G. P. S., Vermaesen L., *Bull. Centre phys. nucl. l'Univ. libre, Bruxelles*, № 13a (1950).
4. Bonetti A., Dilworth C. C., Occhialini G. P. S., *Bull. Centre phys. nucl. l'Univ. libre, Bruxelles*, № 13b (1951).
5. Dilworth C. C., Occhialini G. P. S., Samuel E., *Bull. Centre phys. nucl. l'Univ. libre, Bruxelles*, № 2 (1948).

* См. статью 17, стр. 157.

** См. статью 18, стр. 177.

Б. Стиллер, М. Шапиро и Ф. О'Делл
СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ТОЛСТОСЛОЙНЫХ
ЯДЕРНЫХ ЭМУЛЬСИЙ*

B. Stiller, M. Shapiro, F. O'Dell, Phys. Rev., 85, No 4, 712 (1952).

Описывается видоизмененная техника равномерного проявления сверхчувствительных эмульсий толщиной 400 μ по методу температурного цикла [1]. Благоприятное соотношение между минимальной плотностью зерен и плотностью вуали достигается посредством теплого «сухого» проявления амидоловым проявителем при 23° в течение ≈ 20 мин. Сухое проявление уменьшает также область выпадения поверхностного коллоидного серебра. Новый способ предварительного осушения ведет к дальнейшему уменьшению количества осажденного серебра и уменьшает опасность повреждения влажной набухшей эмульсии. Авторы подтвердили результат, найденный другими исследователями [1], что набухание значительно уменьшается в результате фиксирования и промывки при 5°. Время просветления эмульсий толщиной 400 μ увеличивается в этих условиях менее чем на 30%. Тенденция высушенной толстослойной эмульсии отрываться от стекла уменьшается путем: а) погружения в раствор пластификатора, б) применения защитной пленки и в) хранения и использования в условиях постоянной влажности. Уничтожение следов вуали (фона) и дополнительная сенсibilизация для восстановления чувствительности эмульсий Ильфорд G5 толщиной 400 μ достигается путем выдерживания в течение 7 дней в насыщенных парах воды при 35° с последующей сушкой [2]. Стопка эмульсий без стеклянной подложки представляет большой чувствительный объем, в котором следы легко могут быть прослежены при переходе из одного слоя в следующий [3]. Боковое набухание ($\approx 25\%$), которое до настоящего времени препятствовало успешному применению таких эмульсий, устраняется специальным методом крепления и обработки, основанным на предложении Уоллера (Ильфорд).

ЛИТЕРАТУРА

1. Dilworth, Occhialini, Vermaesen, Bull. Centr. phys. nucl., Bruxelles, № 13a; Bonetti et al., ibid., № 13b.
2. Винер, Игода Г., Фотографический метод в ядерной физике, Издательство, 1952, статья 23.
3. Demers P., Phys. Rev., 78, 320 (1950).

* Краткий реферат доклада. — Прим. ред.

IV. СВОЙСТВА ФОТОСЛОЕВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

17

Р. Берримэн

РАЗЛИЧИЕ СЛЕДОВ ЧАСТИЦ В ЯДЕРНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ

R. W. Berri man, Photogr. Sensitiv., pp. 272—285.

Целью настоящей работы являлось выяснение того, как влияет величина отношения галогенид серебра/желатина* на различные следы в ядерных эмульсиях NT.

Так называемая ядерная эмульсия принципиально не отличается от других типов галогенидосеребряных эмульсий. Вероятно, справедливо будет сказать, что любая галогенидосеребряная эмульсия способна регистрировать тот или иной ядерный след. Можно утверждать, что большая часть эмульсий будет регистрировать следы α -частиц, и весьма вероятно, что некоторые эмульсии, например высокочувствительные негативные и рентгеновские эмульсии, будут регистрировать также следы частиц с минимальной удельной ионизацией. Способность или неспособность эмульсии к регистрации следа зависит только от двух факторов — ионизирующей способности частицы и собственной чувствительности индивидуальных микрокристаллов галогенида серебра. Эмульсии NT не представляют исключения в отношении собственной чувствительности микрокристаллов.

Почему же в таком случае новые эмульсии, разработанные за последние несколько лет и специально предназначенные для регистрации ядерных следов, обладают особыми качествами по сравнению со старыми эмульсиями? Дело в том, что следы, созданные ядерными частицами, видимы только в том случае,

* В настоящей работе термин «желатина» в величине отношения галогенид серебра/желатина означает сумму всех составляющих эмульсии, кроме галогенида серебра,

если они различимы как следы на фоне зерен вуали; эта различимость в свою очередь зависит от плотности зерен в следе, числа зерен вуали и длины следа в пределах поля зрения.

Существенное различие между эмульсиями NT и нормальными эмульсиями состоит в том, что такие характеристики, как концентрация бромистого серебра, доля зерен вуали, размер и собственная чувствительность микрокристаллов эмульсий NT, подобраны таким образом, чтобы различение следов на фоне вуали было значительно облегчено сравнительно с другими эмульсиями.

Несмотря на отличные качества современных эмульсий, вполне возможно, что мы еще не достигли оптимальной комбинации указанных характеристик, которая дала бы наилучшую различимость следов.

Усовершенствование современных эмульсий NT протекало довольно незакономерно. Сначала эмульсии улучшенного качества были получены путем увеличения отношения галогенид серебра/желатина, и это отношение было доведено до максимального значения, достижимого при изготовлении эмульсии в производственном масштабе. Затем чувствительность эмульсий была повышена путем повышения чувствительности индивидуальных микрокристаллов, что позволило регистрировать следы электронов. В последнее время были изготовлены эмульсии, чувствительные к частицам с минимальной удельной ионизацией.

Высокое отношение галогенид серебра/желатина не обязательно является желательной характеристикой эмульсии, так как оно влечет за собой трудности в обработке, особенно, толстых слоев. Первоначальным поводом к увеличению этого отношения являлось желание получить как повышенную чувствительность, так и большую точность в измерении длины сравнительно коротких следов. Разброс длин следов для частиц минимальной ионизации не столь велик, как для короткопробежных частиц, и он определенно является функцией как чувствительности микрокристаллов, так и их концентрации.

Различение следов с небольшой плотностью зерен значительно ухудшается наличием вуали, и возможно, что эмульсии с высокой собственной чувствительностью микрокристаллов могут дать такую же или даже лучшую различимость при более низком отношении галогенид серебра/желатина, чем в современных ядерных эмульсиях.

Ниже перечислены достоинства и недостатки, связанные с уменьшением отношения галогенид серебра/желатина.

Достоинства:

1. Уменьшение числа зерен вуали в единице объема.
2. Облегчение счета зерен.

3. Может быть повышено отношение концентрации элементов — наполнителей к серебру.
4. Уменьшение времени фиксирования.

Недостатки:

1. Уменьшение плотности зерен в следах.
2. Концы следов будут определены менее точно.

Хотя преимуществ больше, чем недостатков, они бесполезны, если различение следов будет ухудшаться, и значение оптимума отношения галогенид серебра/желатина для получения максимума эффективной чувствительности будет полностью зависеть от того, как два противоположных эффекта — уменьшение вуали и уменьшение плотности зерен — повлияют на различимость следов. Так как различение следов зависит от субъективного фактора, то его следует изучать опытным путем. В настоящем исследовании применялся метод, в котором использовались макеты искусственных следов и вуали.

§ 1. Метод исследования влияния величины отношения галогенид серебра/желатина на различение следов

Прежде всего для проведения настоящего исследования необходимо было получить серию следов частиц различной ионизирующей способности в серии эмульсий, обладающих постоянной собственной чувствительностью микрокристаллов, но с переменным отношением галогенид серебра/желатина. Желательно было также рассмотреть две или несколько серий таких эмульсий с различной собственной чувствительностью микрокристаллов и с различной плотностью вуали. Необходимо учитывать, что оба эти свойства несколько меняются от одной эмульсии к другой.

Возможны два способа исследования рассматриваемой проблемы. Наиболее прямой способ заключается в приготовлении эмульсии с различным отношением галогенид серебра/желатина, различной плотностью вуали и различной чувствительностью; далее необходимо изучить влияние этих факторов на различение следов. Помимо значительной экспериментальной работы, этот метод связан с двумя трудностями. Во-первых, он предполагает, что в распоряжении исследователя имеется целый набор частиц, обладающих широким интервалом ионизирующей способности, ибо это позволило бы определить минимальную ионизирующую способность, как раз необходимую для получения удовлетворительного следа в различных эмульсиях. Другая трудность заключается в том, что галондосеребряные эмульсии, и особенно эмульсии NT, несколько неустойчивы, и самые простые операции, вроде разбавления желатиной или даже просто процесс полива и высушивания, могут привести к осложнениям в работе.

В одной из работ настоящего сборника * показано, что зерна вуали в эмульсии и зерна вдоль следа распределены чисто статистически, и поэтому наша проблема может быть сведена к исследованию легкости различения черных точек, случайно расположенных вдоль линии, на фоне черных точек, рассеянных по закону случая на поверхности. Таким образом, второй метод исследования сводится к построению ряда макетов искусственной вуали с переменным числом зерен вуали на единице поверхности и другого ряда макетов искусственных следов с различной плотностью зерен. Далее путем наложения каждого члена одного ряда поочередно на каждый член другого ряда находят визуальным рассмотрением зависимость различимости от плотности вуали и плотности зерен в следах. Если известна зависимость плотности вуали и плотности зерен от отношения галогенид серебра/желатина для каждой данной дисперсии галогенида серебра, то можно будет найти интересующие нас данные.

В настоящем исследовании был использован второй метод, так как он более точен и, вероятно, дает более общую картину интересующей нас проблемы, чем исследование конкретных эмульсий. Конечно, каждый вывод, полученный таким методом, может быть далее проверен путем испытания небольшого числа эмульсий.

§ 2. Методика эксперимента

Исходным моментом исследования являлся выбор характеристик стандартной искусственной эмульсии. Так как различение следов частиц минимальной ионизирующей способности представляло наибольший интерес, то стандартная эмульсия должна быть подобна эмульсии Кодак NT4. Для стандартной эмульсии были выбраны следующие характеристики:

1. Отношение галогенид серебра/желатина равно этому отношению для эмульсии NT4, т. е. 5,6 по весу или 1,08 по объему.

2. Сферические микрористаллы диаметрами 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 и 0,6 μ присутствуют в отношении 1 : 4 : 6 : 4 : 1.

Вычислялась максимальная плотность зерен в следе в этой эмульсии и вычерчивались серии пар искусственных следов с плотностями зерен от 5 до 100% максимальной плотности, причем каждый след представлял отрезки по 50 μ (при увеличении 1500) ядерных следов, которые были бы созданы в эмульсии частицами различной ионизирующей способности.

Кроме того, были изготовлены серии макетов искусственной вуали, в которых крайние числа зерен вуали на единице площади относились как 250 : 1, что приблизительно соответствовало фактическим данным для эмульсий NT4, если их рассматривать

* См. статью 18, стр. 177.

при помощи иммерсионного объектива при увеличении 1500. Методы изготовления этих макетов следов и вуали описаны в приложении.

Посредством наложения макетов вуали поочередно на каждый макет следов и визуальной оценки комбинированного эффекта можно было определить для каждого значения плотности зерен в следе ту максимальную концентрацию зерен вуали, при которой: 1) могли быть различены оба следа каждой пары и 2) различение одного из следов было сомнительным. Эти два

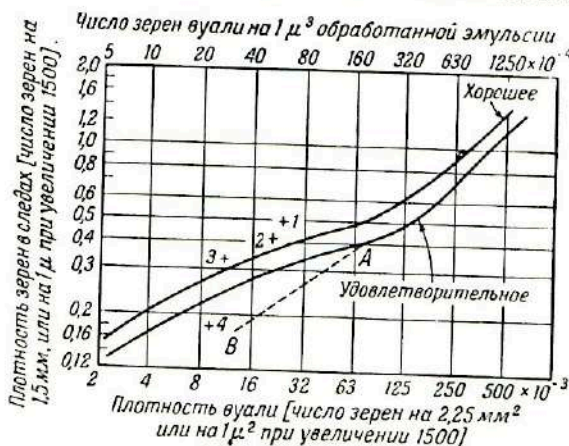


Рис. 1. Основные кривые различения.

уровня различения были названы: 1) хорошим различением, соответствующим границе легкой различимости обоих следов, и 2) удовлетворительным различением, приблизительно соответствующим вероятности различения, равной $1/2$.

На основании полученных результатов проводились кривые различения следов, показывающие минимальную плотность зерен в следе, необходимую для каждого уровня различения для каждой данной вуали в пределах графика. Эти кривые изображены на рис. 1, где плотность зерен в следах и плотность вуали отложены в логарифмическом масштабе. Кривые имеют две точки перегиба. Одна из этих точек приблизительно соответствует плотности зерен в следе, равной 0,30 зерен на $1 \mu^2$, и интерпретируется как точка (при увеличении 1500), в которой впервые становятся различимыми «дубликаты» зерен, т. е. соседние зерна следа, разделенные весьма малым промежутком. До этой точки следы представляют собой далеко отстоящие друг от друга отдельные зерна и лишь с большим трудом различимы на фоне вуали. После появления дублетов последние служат ориентирами для следов и значительно облегчают их различение; в результате уменьшается

наклон кривой плотность следа — плотность вуали. Вторая точка перегиба соответствует плотности вуали около 0,10 зерен на $1 \mu^2$ и интерпретируется как точка (при увеличении 1500), в которой вуаль начинает сильно затруднять наблюдение. Дальнейшее увеличение вуали за этой точкой значительно ухудшает различение следов, и наклон кривой плотность следа — плотность вуали возрастает. Несмотря на то, что макеты искусственной вуали и следов установлены на основе эмульсии Кодак NT4, кривые различения имеют вполне общее значение и показывают изменение различимости линии из черных точек на фоне черных точек; поэтому на осях координат рис. 1 можно отложить число точек на единице площади и число точек на единице длины безотносительно к какой-либо конкретной эмульсии.

Поэтому полученные выше кривые различения следов могут быть приложены к ряду эмульсий с различным отношением галогенид серебра/желатина при условии, что нам известна зависимость 1) плотности следа (для данной ионизирующей способности) и 2) плотности вуали (для данной доли зерен вуали в эмульсии) от отношения галогенид серебра/желатина. В следующем разделе показано, что обе эти зависимости могут быть вычислены теоретически.

§ 3. Теоретическая часть

В теоретических вычислениях будут применяться нижеследующие обозначения.

b_w — весовое отношение галогенид серебра/желатина:

$$b_w = \frac{\text{Вес галогенида серебра в единице объема необработанной эмульсии}}{\text{Вес желатины в единице объема необработанной эмульсии}},$$

b — объемное отношение галогенид серебра/желатина:

$$b = \frac{\text{Объем галогенида серебра в единице объема необработанной эмульсии}}{\text{Объем желатины в единице объема необработанной эмульсии}},$$

δ_1 — удельный вес галогенида серебра,

δ_2 — удельный вес желатины,

c — весовая концентрация галогенида серебра в $г/см^3$ необработанной эмульсии,

v — объемная концентрация галогенида серебра в $см^3/см^3$ необработанной эмульсии,

r, d — радиус и диаметр микрокристаллов галогенида серебра,

s — собственная чувствительность микрокристаллов галоидного серебра, которая может быть определена как количество энергии, необходимой для образования скрытого изображения,

N — плотность следа (число зерен на микрон длины следа),
 dE/dx — ионизирующая способность,
 f — доля полного числа эмульсионных микрокристаллов, способных к самопроизвольному проявлению.

Зависимости между приведенными выше величинами:

$$\begin{aligned}b_w &= b\delta_1/\delta_2 \\ v &= c/\delta_1 \\ v &= b/(b+1).\end{aligned}$$

Плотность следов. Проходя через эмульсию, частица пересекает некоторое число эмульсионных микрокристаллов. Среднее число затронутых частицей микрокристаллов на единице длины пробега дается формулой Жданова [1]:

$$N = 0,23 \, c/d.$$

Если в эмульсии присутствуют микрокристаллы разных размеров, то число их на единице длины равно

$$0,23(a_1c/d_1 + a_2c/d_2 + a_3c/d_3 \dots a_nc/d_n) = 0,23 \, c \sum a/d,$$

где

$$a_1c, a_2c, a_3c, \dots, a_nc$$

— парциальные концентрации микрокристаллов диаметром $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ в $г/см^3$.

Весьма вероятно, что только микрокристаллы, действительно пересеченные частицей, приобретают способность проявляться, так что приведенное только что выражение дает максимальную плотность зерен, ибо оно представляет плотность следа частицы, которая сообщает способность проявляться всем микрокристаллам, лежащим на ее пути, т. е.

$$N_{\text{макс.}} = 0,23c \sum a/d.$$

Однако вообще лишь некоторая доля общего числа микрокристаллов, пересеченных частицей, становится проявляемой. Эта доля возрастает с увеличением ионизирующей способности частицы, и, кроме того, она зависит от собственной чувствительности микрокристаллов и их диаметра. Это может быть представлено выражением

$$\frac{\text{Действительная плотность зерен}}{\text{Максимальная плотность зерен}} = \frac{N}{N_{\text{макс.}}} = \Phi(dE/dx, s, d).$$

Разумно принять, что величина этой доли не зависит от промежутка между микрокристаллами, т. е. не зависит от отношения галогенид серебра/желатина.

В настоящей работе рассматривается только влияние отношения галогенид серебра/желатина на различение следов. В ней будут исследованы серии эмульсий, в которых распределение микрокристаллов по размерам и чувствительности одинаково для всех эмульсий данной серии, а единственной переменной является полное число микрокристаллов в данном объеме желатины. Для таких серий эмульсий пригодно выражение

$$N_{\text{макс.}} = 0,23c \sum a/d = 0,23\delta_1 [b/(b+1)] \sum a/d, \quad (1)$$

где $\sum a/d$ одинаково для всех эмульсий, и

$$N/N_{\text{макс.}} = \Phi(dE/dx, s, d), \quad (2)$$

где s и d одинаковы по всей серии, т. е. $N_{\text{макс.}}$ зависит только от c и прямо пропорционально этому коэффициенту, а $N/N_{\text{макс.}}$ зависит только от ионизирующей способности.

Формулы (1) и (2) позволяют представить плотность зерен в следе как долю или процент максимальной плотности для каждого значения отношения галогенид серебра/желатина.

Плотность вуали. Для оценки влияния изменения отношения галогенид серебра/желатина на различение следов необходимо рассмотреть искусственные следы (плотность зерен которых может быть выражена теперь как доля максимальной плотности для любого требуемого отношения галогенид серебра/желатина) в комбинации с соответствующим макетом вуали. Необходимая для этой цели зависимость между плотностью вуали и отношением галогенид серебра/желатина может быть выведена следующим путем.

Когда толстый слой обработанной эмульсии рассматривают под микроскопом, то видны те зерна вуали, которые находятся в слое с толщиной, равной глубине фокуса данного объектива, и на площади, равной полю зрения микроскопа. Если используют иммерсионный объектив с глубиной фокуса 4μ , то число зерен вуали на $1 \mu^2$ рассматриваемой площадки равно их числу в $4 \mu^3$ обработанной эмульсии.

В стандартной эмульсии средний объем, приходящийся на одно зерно, равен $0,04 \mu^3$. Полное число зерен в единице объема необработанной эмульсии равно

$$\frac{\text{Объем галогенида серебра в единице объема}}{\text{Средний объем на одно зерно}} = \frac{v}{0,04}.$$

Обычно лишь небольшая часть f этих зерен обладает способностью к самопроизвольному проявлению, и число таких потенциальных зерен вуали в $1 \mu^3$ необработанной эмульсии равно

$$vf/0,04 = bf/0,04(b+1).$$

Для типичных эмульсий NT f представляет весьма малую долю, порядка 10^{-3} — 10^{-4} .

После проявления и фиксирования зерна вуали превращаются в серебро, а остальной галогенид серебра удаляется, и после сушки толщина слоя становится меньше исходной. Следовательно, число зерен вуали в единице объема обработанной эмульсии превосходит это число в необработанной эмульсии во столько раз, во сколько исходная толщина больше конечной.

Это отношение (коэффициент усадки) * равно

$$\frac{\text{Толщина до обработки}}{\text{Толщина после обработки}} = \frac{\text{Объем галогенида серебра} + \text{объем желатины}}{\text{Объем зерен вуали} + \text{объем желатины}} = b + 1,$$

так как объемом зерен вуали в любой эмульсии NT можно пренебречь сравнительно с объемом желатины.

Следовательно, число зерен вуали в единице объема обработанной эмульсии равно

$$bf(b+1)/0,04(b+1) = bf/0,04,$$

и число зерен вуали на 1 м^2 эмульсионного слоя толщиной 4 м равно

$$bf \cdot 10^2. \quad (3)$$

Выражение (3) является искомой зависимостью, которая позволяет выразить плотность вуали (число зерен на единице площади) как долю общего числа зерен эмульсии для любого значения отношения галогенид серебра/желатина.

§ 4. Кривые различения следов для эмульсий с различным отношением галогенид серебра/желатина

Основные данные по различению приведены на рис. 1 в виде кривой, связывающей абсолютные значения плотности следов и абсолютные значения плотности вуали для двух уровней различения. Кривые различения следов для любого отношения галогенид серебра/желатина строились, исходя из основных кривых, следующим образом.

Любая из комбинаций след — вуаль, которая по визуальной оценке дает удовлетворительное (или хорошее) различение, может рассматриваться как представляющая условия для удовле-

* Коэффициент усадки не может быть вычислен с достаточной точностью, так как он изменяется со степенью промывки при обработке и с влажностью атмосферы. Поэтому приведенное выше выражение является лишь приближенным.

творительного (или хорошего) различия в эмульсии с любым отношением галогенид серебра/желатина, причем действительная плотность следа представляет определенную долю максимальной возможной плотности для рассматриваемого отношения галогенид серебра/желатина, а зерна вуали составляют определенную долю полного числа зерен, присутствующих в эмульсии с тем же отношением галогенид серебра/желатина. Для каждого отдельного макета след — вуаль значения этих долей будут, конечно, различны для различных отношений галогенид серебра/желатина.

При помощи уравнений (1) и (3) основные данные были пересчитаны в доли вуали и доли максимальной плотности зерен для каждого значения b , т. е. для каждого интересующего нас значения отношения галогенид серебра/желатина. В табл. 1 показан результат такого пересчета для одной частной комбинации след — вуаль при семи различных отношениях галогенид серебра/желатина.

Таблица 1

Ag X/желатина b	Максимальная плотность зерен из формулы (1)	0,30 зерен на 1μ как доля максимального значения, %	Вуаль, эквивалентная $2,2 \cdot 10^{-2}$ зерен на $1\mu^2$, %
$1/8$ NT	0,40	75	0,176
$1/4$ NT	0,72	42	0,088
$1/2$ NT	1,19	25	0,044
1NT	1,76	17	0,022
2NT	2,31	13	0,011
4NT	2,76	11	0,0055
8NT	3,05	9,8	0,0028

Комбинация из макета следа с плотностью 0,30 зерен на 1μ , и макета вуали с плотностью $2,2 \cdot 10^{-2}$ зерен на $1\mu^2$ дает удовлетворительное различие.

Третий и четвертый столбцы дают координаты точек из кривых удовлетворительного различия соответственно для $1/8$ NT, $1/4$ NT, $1/2$ NT, 1NT, 2NT, 4NT и 8NT. Аналогичным образом из других комбинаций макетов следов и вуали, дающих удовлетворительное разрешение, можно было получить другие точки на этих кривых. Далее на том же графике вычерчивались кривые различения следов для ряда различных отношений галогенид серебра/желатина путем нанесения вуали (в процентах) как функции плотности следов (в процентах от максимальной плотности).

На рис. 2 изображены две такие кривые А и В для двух значений отношения галогенид серебра/желатина. Так как доля вуали (в процентах) и доля плотности зерен в следах (в про-

центах от максимальной плотности) не зависят от отношения галогенид серебра/желатина, то рис. 2 непосредственно показывает, что отношение *A* дает худшее различение следов, чем отношение *B*. Это следует из того, что след частицы с ионизирующей способностью, достаточной для проявляемости 20% зерен вдоль ее пробега, затемняется в случае отношения *A* более низкой долей зерен вуали, чем для отношения *B*. Аналогичным образом эмульсия *A* с вуалью 0,063% нуждается в большей доле проявленных зерен вдоль следа частицы, чем эмульсия *B*, т. е. для

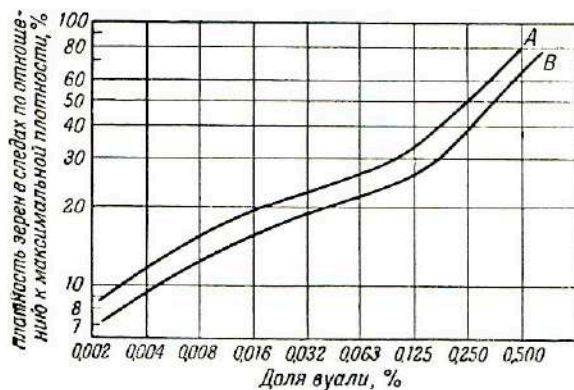


Рис. 2. Кривые удовлетворительного различения для двух различных отношений галогенид серебра/желатина.

удовлетворительного различения следа в эмульсии *A* требуется частица с большей ионизирующей способностью, чем в эмульсии *B*.

На рис. 3—5 показаны экспериментальные точки, полученные для различных отношений галогенид серебра/желатина. На рис. 3 приведены точки, полученные для удовлетворительного различения. Термин «удовлетворительное различение» субъективен, и на этом рисунке показан разброс результатов, полученных одним наблюдателем в двух опытах и тремя другими независимыми наблюдателями. На рис. 4 показаны точки, полученные одним наблюдателем для хорошего различения.

Обе эти серии точек показывают, что нормальное и удвоенное отношение галогенид серебра/желатина дает кривые различения следов, которые лежат весьма близко одна от другой и расположены ниже всех других кривых семейства. Для половины нормального отношения и учетверенного отношения кривые лежат несколько выше первых двух, а отношения, более чем в 4 раза

превосходящие нормальное или меньшее $1/8$ нормального, дают еще более высоко лежащие кривые.

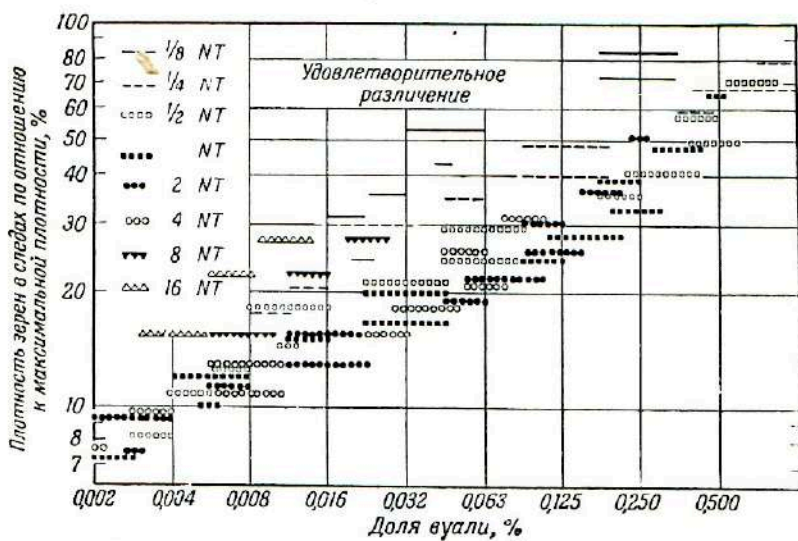


Рис. 3. Результаты, полученные для удовлетворительного различия.

Эти результаты показывают, что при возрастании отношения галогенид серебра/желатина различие следов проходит через

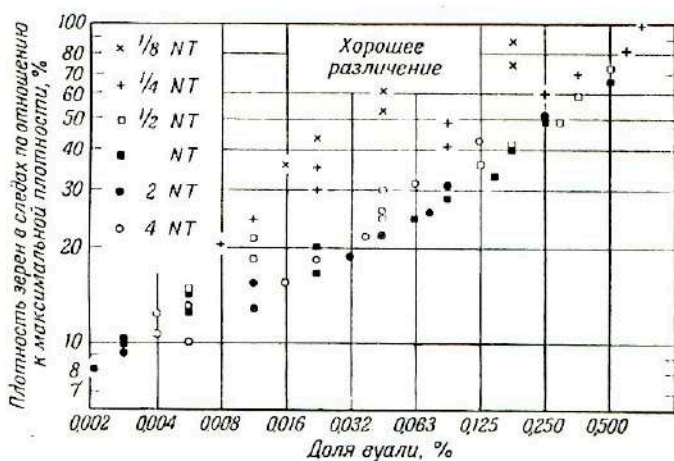


Рис. 4. Результаты, полученные для хорошего различия.

максимум. Они показывают также, что значение этого отношения для максимального различия достигается без особого труда и

что отношение, используемое в фабричных эмульсиях NT, действительно лежит в области максимального различия. Приведенные кривые позволяют заключить, что дальнейшее увеличение отношения галогенид серебра/желатина не улучшит различения следов.

Если уменьшить отношение галогенид серебра/желатина до половины его нормального значения, то, как видно из кривых, будет происходить некоторое ухудшение различения в области с вуалями ниже 0,25%. Однако уменьшение отношения имеет

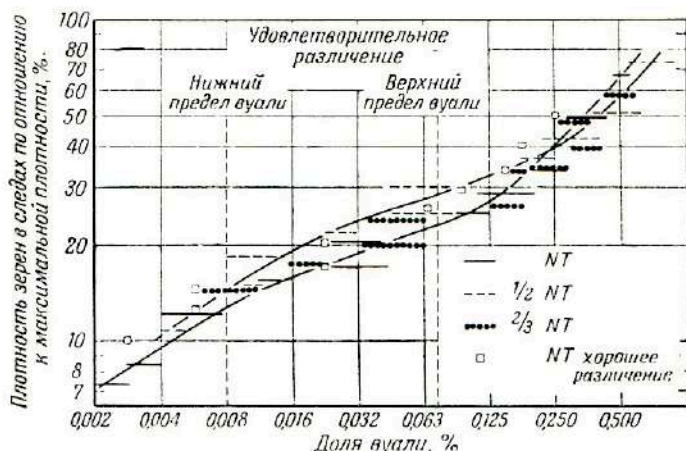


Рис. 5. Кривые различения для эмульсий NT, 2/3 NT и 1/2 NT.

другие преимущества, и поэтому следует более подробно исследовать степень падения различения следов.

Результаты для удовлетворительного различения с нормальным отношением галогенид серебра/желатина и отношением вдвое меньше нормального нанесены на рис. 5, и через каждый ряд точек приведены плавные кривые. Две вертикальные линии указывают предельные значения вуали, в которых обычно лежат эмульсии NT4. Может показаться, что эти предельные значения охватывают довольно широкий интервал, однако они соответствуют крайне малым значениям вуали сравнительно с обычными фотографическими эмульсиями. Если полить эмульсию с верхним уровнем вуали, т. е. 0,07%, слоем такой толщины, чтобы максимальная оптическая плотность равнялась 10, то плотность вуали будет равна всего 0,007 даже для полностью проявленной эмульсии.

Плотности следов, необходимые для получения удовлетворительного различения при каждом предельном значении вуали,

могут быть найдены из рис. 5 для каждого из двух отношений галогенид серебра/желатина. Эти плотности приведены в табл. 2.

Таблица 2

Плотности следов для различных значений вуали

Пределы плотности вуали, %	Плотность следов			
	доля максимальной плотности следов, %		действительная плотность, число зерен на 100 μ	
	NT	$\frac{1}{2}$ NT	NT	$\frac{1}{2}$ NT
0,008	12,5	14,0	22	17
0,070	23,0	29,0	40	34

Из табл. 2 следует, что для достижения одинакового различия следов при двух отношениях галогенид серебра/желатина эмульсия $\frac{1}{2}$ NT должна содержать следы с плотностью зерен (выраженной в процентах от максимальной плотности) на 11% большей (для нижнего предела) и на 25% большей (для верхнего предела) плотности зерен в эмульсии NT. Если принять плотность зерен (в процентах от максимальной), создаваемую частицей с определенной удельной ионизацией, за меру чувствительности эмульсии, то это будет означать, что эмульсия $\frac{1}{2}$ NT должна обладать на 11% большей чувствительностью чем эмульсия NT при нижнем предельном значении вуали и на 25% большей чувствительностью при верхнем предельном значении.

Однако повышения чувствительности на 25% достаточно, чтобы изменить удовлетворительное различие при нормальном отношении NT в хорошее различие (см. рис. 5). Следовательно, полученные результаты показывают, что двукратное уменьшение отношения галогенид серебра/желатина не имеет никакого смысла, если оно не позволит изготовить эмульсии с чувствительностью на 25% больше, чем у существующих эмульсий.

Понятно, что менее значительное уменьшение отношения галогенид серебра/желатина даст меньшее ухудшение различения; действительно, анализ, подобный произведенному выше, показывает, что для эмульсии $\frac{2}{3}$ NT не наблюдается значительного падения различения. Точки различения для такого отношения изображены на рис. 5.

Правильность выводов о влиянии на различение величины отношения галогенид серебра/желатина в области ниже нормального значения NT, сделанных на основе анализа макетов искусственной вуали и следов, была проверена описанными ниже опытами на реальных эмульсиях.

§ 5. Испытание эмульсий

Эмульсию типа NT разбавляли различными количествами желатинны для получения эмульсий с различными отношениями галогенид серебра/желатина — 1NT, $\frac{2}{3}$ NT, $\frac{1}{2}$ NT и $\frac{1}{4}$ NT. Все эти эмульсии поливали на пластинки, высушивали и хранили в течение одной недели для накопления следов космических частиц. После проявления подсчитывали число зерен в следах частиц с минимальной ионизацией и число зерен вуали. Четыре исследователя независимо друг от друга оценивали полученные слои при увеличении 1500 с точки зрения легкости различения следов. Результаты счета зерен приведены в табл. 3.

Таблица 3

Плотность зерен в следах и в вуали

Эмульсия	AgX/желатина	Измеренная плотность зерен, число зерен/ μ	Измеренная плотность вуали, число зерен/ μ^2	Относительная плотность зерен (=1 для эмульсии NT)		Относительная плотность вуали (=1 для эмульсии NT)	
				найдено	вычислено по формуле (1)	найдено	вычислено по формуле (3)
I	1NT	0,47	$5,9 \cdot 10^{-3}$	1,00	1,00	1,00	1,00
II	$\frac{2}{3}$ NT	0,41	$5,0 \cdot 10^{-3}$	0,87	0,81	0,85	0,66
III	$\frac{1}{2}$ NT	0,33	$2,7 \cdot 10^{-3}$	0,71	0,65	0,46	0,50
IV	$\frac{1}{4}$ NT	0,18	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,40	0,40	0,38	0,25

Для всех четырех эмульсий наблюдаемое падение плотности зерен с уменьшением отношения галогенид серебра/желатина находится в хорошем согласии с вычисленным по формуле (1). Это указывает на правильность формулы (2) и на то, что разбавление желатиной не влияет на чувствительность эмульсии. В случае вуали согласие менее удовлетворительно, однако значительных расхождений между вычисленными и найденными величинами не наблюдается. Неустойчивость результатов, повидимому, обусловлена неустойчивостью самих эмульсий, что явилось одной из причин, по которой исследование искусственных следов предпочли более прямому исследованию реальных эмульсий.

Все четыре наблюдателя одинаково оценили относительную легкость различения следов в четырех слоях (табл. 4).

Относительное изменение различения при уменьшении отношения галогенид серебра/желатина очень хорошо согласуется с предсказанным эффектом — эмульсия $\frac{2}{3}$ NT дает почти такое же различение, как эмульсия NT, в эмульсии $\frac{1}{2}$ NT различение значительно хуже и в эмульсии $\frac{1}{4}$ NT еще хуже, чем в эмульсии $\frac{1}{2}$ NT.

Таблица 4
Качество различения следов

Эмульсия	Различение следов
I	Очень хорошее
II	Очень хорошее (слегка хуже первой)
III	Хорошее
IV	Удовлетворительное

Точки (1—4), представляющие значения плотности следов и вуали для каждой из четырех эмульсий, изображены на рис. 1. Положение этих точек относительно кривых хорошего и удовлетворительного различения хорошо согласуется с визуальной оценкой различения следов, приведенной в табл. 4. Исключением является лишь эмульсия IV, для которой соответствующая точка лежит значительно ниже кривой удовлетворительного различения.

Дальнейшие данные по кривым различения следов для реальных эмульсий были получены Коутсом*, который получил уравнение, связывающее плотность следов и плотность вуали для постоянного уровня различения. Он нашел, что результаты наблюдений для реальных эмульсий хорошо согласуются с этим уравнением. Кривая, полученная из этого уравнения для удовлетворительного различения, проведена на рис. 1 (линия АВ); она охватывает интервал плотностей вуали, наблюдавшихся в его опытах. Две кривые различения следов, т. е. «искусственная» и «экспериментальная», встречаются при плотности следа, равной 0,41 зерен на 1 μ , но расходятся ниже этого значения и при минимальном уровне вуали дают для плотности следов значения 0,17 зерен на 1 μ соответственно 0,25 зерен на 1 μ . Если исходить из этой экспериментальной кривой различения следов, то эмульсии I, II и III попадают в одну группу с одинаковой различимостью следов, а эмульсия IV — в группу со значительно худшей различимостью.

Характер расхождения двух кривых различения на рис. 1 совпадает с ожидаемым, так как следующие рассуждения покажут, что условия визуального наблюдения искусственных следов приводят к завышению плотности зерен, необходимой для удовлетворительного различения, и наоборот, условия наблюдения реальных следов могут привести к занижению плотности.

Искусственные следы представляли пары изолированных отрезков длиной по 50 μ , и критерием удовлетворительного различения служило условие точной идентификации одного из двух

* См. статью 18, стр. 177.

следов. При наблюдении эмульсий любое сомнение в наличии следа могло быть подтверждено или опровергнуто путем исследования участков эмульсии, лежащих вне сомнительной части. Если след уже был идентифицирован как таковой, то часто можно было проследить его путь через эмульсию даже в том случае, если отдельные его участки были неразличимы. Кроме того, вертикальное перемещение микроскопа часто помогало различить следы на фоне вуали. Все эти вспомогательные средства отсутствуют при визуальной оценке искусственных макетов следы — вуаль, и поэтому этот метод должен приводить к завышению требуемой плотности зерен.

При оценке различимости на искусственных макетах следы — вуаль уже заранее было известно, что следы на них имеются. Так, например, для получения удовлетворительного различения в качестве подходящего макета вуали выбирался такой макет, который позволял отчетливо наблюдать один след, и если возникало какое-либо сомнение относительно выполнения этого условия, то выбиралась более низкая плотность вуали. Таким образом, удовлетворительное различение означает, что вероятность различения 50-микронного отрезка следа равна 50 случаям из 100 или более.

При исследовании эмульсий, дающих только удовлетворительные следы частиц минимальной ионизации и в которых число таких следов неизвестно, отрезки следов, которые будут обнаружены первыми, обычно имеют плотность зерен или долю дублетов выше средней. Эти отрезки будут метками, служащими для идентификации следа, который благодаря им может быть прослежен в остальной части эмульсии. Если принять такой критерий удовлетворительного различения следов, то вероятность распознавания будет равна $\frac{1}{4}$ или даже меньше.

Эти различия между двумя методами должны, вероятно, возрастать с уменьшением вуали (с соответствующим уменьшением плотности зерен для данного уровня различения). Искусственные следы с плотностью 0,17 зерен на $1\ \mu$ состояли из довольно далеко отстоящих друг от друга зерен, поэтому их очень трудно было идентифицировать, если вуаль не была крайне низка; однако впечатление о наличии следа создавалось и при значительно более плотной вуали. В реальной эмульсии некоторые следы с такой средней плотностью будут содержать участки, состоящие либо из дублетов зерен, либо имеющие плотность зерен выше средней; следовательно, такие участки будут идентифицированы как отрезки следа, который затем может быть прослежен на остальном пути через эмульсию. При более высоких плотностях зерен вероятность получения дублетов на 50-микронных отрезках будет повышена, и расхождение между двумя методами будет соответственно понижено.

Учитывая эти возможные различия и весьма большую разницу между «искусственным» и «экспериментальным» методами, следует считать, что относительное положение двух кривых на рис. 1 является вполне удовлетворительным. Истинная кривая различения лежит, вероятно, между этими двумя кривыми, однако поскольку «искусственный» метод ведет к занижению, а «экспериментальный» метод — к завышению различимости следов в эмульсиях, то первый метод следует считать более надежным.

§ 6. Выводы

Анализ влияния отношения галогенид серебра/желатина на различение следов, произведенный при помощи искусственных следов и вуали, позволяет установить интервал отношений, в котором различение оптимально. Отношение, принятое для эмульсий NT, лежит в найденном интервале, и уменьшение его значения вдвое, т. е. соответствующее увеличению количества желатины в эмульсии, приводит к значительному ухудшению различения. Уменьшение отношения до $\frac{2}{3}$ NT, соответствующее 50%-ному увеличению количества желатины, не вызывает заметного ухудшения различения.

Результаты, полученные на реальных эмульсиях, очень хорошо согласуются с этими предсказаниями.

ПРИЛОЖЕНИЕ

При построении макетов вуали и следов принималось, что эмульсия состоит из сферических зерен пяти различных размеров. Диаметры зерен относились как 2:3:4:5:6, а числа зерен каждого размера соответственно как 1:4:6:4:1. Для изготовления макетов пользовались круглыми пробойниками диаметром 2, 3, 4, 5 и 6 мм, при помощи которых пробивали отверстия в стопке больших листов миллиметровой бумаги (50×40 см). Положение отверстий и размер пробойника для каждого отверстия определялись из таблиц случайных чисел. Когда достигалась наименьшая плотность, верхний лист бумаги удалялся и пробивание продолжалось до тех пор, пока не достигался следующий уровень плотности вуали и следов; затем снова удаляли верхний лист и т. д.

Макеты вуали. Для изготовления этих макетов использовались три столбца случайных чисел. Первый и второй столбцы содержали трехзначные числа от 000 до 500 и соответственно от 000 до 400 и определяли координаты центра каждого пробитого отверстия. В третьем столбце находились двузначные числа от 00 до 99, которые определяли размер пробойника. Для этой цели

числа от 00 до 99 разбивались на пять групп, т. е. от 00 до 05, от 06 до 30, от 31 до 68, от 69 до 94 и от 95 до 99. Если число третьего столбца попадало в первую группу, то использовался пробойник 2 мм, если во вторую группу, то пробойник 3 мм и т. д. Это дает распределение пяти размеров, весьма близкое к требуемому отношению 1 : 4 : 6 : 4 : 1. Всего было изготовлено 17 макетов; число пробитых отверстий в каждом из них увеличивалось в отношении $\sqrt{2}$ от одного макета к следующему.

Макеты следов. В этом случае прежде всего изготовлялся чертеж следа с максимальной плотностью зерен, в котором положение и размер каждого зерна были известны. Далее изготовлялись макеты следов с различными плотностями зерен. Для этого вдоль следа максимальной плотности зерен производилась случайная выборка зерен и в макете пробивались соответствующие отверстия.

Для стандартной эмульсии $\sum a/d$ равна 2,25 и максимальная плотность зерен по формуле (1) составляет 1,76 зерен на 1 р.

Для построения следа длиной 100 μ , т. е. содержащего 176 зерен, зерна пронумеровывались от 1 до 176, и для определения размера каждого зерна можно было использовать один столбец двузначных случайных чисел, разбитый на группы в правильном соотношении, как это описано выше.

Центры всех зерен вдоль следа не обязаны лежать на его оси, а могут быть расположены вне оси на различных расстояниях от нее, вплоть до расстояния, равного радиусу соответствующего зерна. Поэтому для построения искусственных следов следовало задаться распределением расстояний центров зерен от оси. Приближенное распределение вычислялось следующим путем.

На рис. 6 вертикальная стрелка указывает направление луча зрения при рассмотрении под микроскопом, а радиус круга равен радиусу зерна. Для каждого данного размера зерна известно было число зерен в следе длиной 100 μ , и доля зерен этого размера, расстояния которых от оси лежат между границами x_1 и x_2 , будет равна отношению площади зачерненного участка к площади всего круга. Это отношение можно вычислить и тем самым определить долю зерен, лежащих на расстояниях между x_1 и x_2 , x_2 и x_3 и т. д. от оси. В табл. 5 приведен ряд таких долей для $x_1 = 0,2R$, $x_2 = 0,4R$ и т. д.

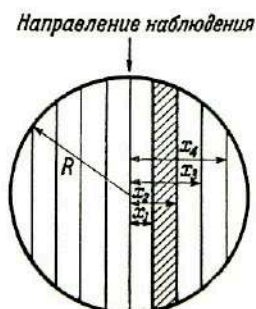


Рис. 6. Чертеж, поясняющий метод нахождения распределения расстояний зерен, задетых частицей, от оси следа.

Таблица 5

Расстояние от оси, доли R	от $\pm 1,0$ до $\pm 0,8$	0,8 0,6	0,6 0,4	0,4 0,2	0,2 0,1
Доля зерен	1,0	1,73	2,12	2,32	2,42

Для определения положения каждого зерна, лежащего вне оси, т. е. его расстояния от оси, выраженного в долях диаметра этого зерна, использовался второй столбец двузначных случайных чисел от 00 до 99, разбитый на 5 групп в надлежащем соотношении.

Еще одной неизвестной переменной являются расстояния между зернами. При первой попытке решения данного вопроса эти расстояния считались одинаковыми, т. е. равными разности между полной длиной следа и полной длиной самих зерен вдоль следа, все деленное на число зерен в следе. Возможно, что экспоненциальное распределение этих промежутков между зернами было бы более правильным, однако нет оснований предполагать, что такое несколько неверное распределение промежутков скажется на конечных выводах по различению следов при низких плотностях зерен, какое существует в следах частиц минимальной ионизации, хотя при весьма больших плотностях зерен это может играть некоторую роль.

Такой метод дает положение, размер и расстояние от оси всех зерен, составляющих след длиной 100 μ . Серии макетов изготавливались пробивкой отверстий в миллиметровой бумаге, как в случае макетов вуали, причем длина в 100 μ разбивалась на два отрезка по 50 μ .

Порядок, в котором зерна становились проявляемыми, т. е. порядок пробивания отверстий, также определялся из таблицы случайных чисел. По достижении каждой соответствующей плотности зерен верхние листы последовательно удалялись и пробивка продолжалась. Всего было изготовлено 17 пар 50-микронных следов.

Наконец, все макеты, состоящие из серий отверстий, пробитых в белой бумаге, фотографировались на черном фоне при увеличении 6. С полученных таким путем негативов делались контактные отпечатки макетов вуали на стеклянных пластинках и контактные отпечатки каждой пары следов на бумаге. Затем, накладывая пластинки с вуалью на отпечатки следов, можно было оценить суммарный эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданов А., J. phys. radium, 6, 233 (1935).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЯДЕРНЫХ ПЛАСТИНОК

A. C. Coates, *Photogr. Sensitiv.*, pp. 320—326.

При прохождении через ядерную эмульсию частица сообщает способность к проявлению определенному числу эмульсионных микрокристаллов. При данных размерах и данной концентрации микрокристаллов в эмульсии число микрокристаллов, ставших проявляемыми, зависит от их чувствительности и ионизирующей способности частицы. С увеличением чувствительности возрастает главным образом число микрокристаллов. Это свойство можно рассматривать как определение понятия чувствительности эмульсии. Отсюда вытекает наиболее очевидный и прямой метод измерения чувствительности эмульсии, а именно метод счета зерен на единице длины следа, созданного данной частицей. Конечно, прежде чем такой метод можно признать достаточно обоснованным, необходимо определить характер распределения зерен в следах данной частицы, чтобы убедиться в том, что в эмульсии не имеется ни периодических, ни скачкообразных изменений чувствительности, ни других особенностей. Кроме того, следует определить то число следов частиц, которое необходимо проанализировать, чтобы обеспечить требуемую точность.

Практически такой способ оказывается все же несколько примитивным для правильной оценки чувствительности. Прежде всего как сама видимость следа, так и легкость его различения зависят от концентрации зерен вуали, среди которых расположен след частицы. Этот случай аналогичен слышимости звукового сигнала на фоне шума. В другой статье настоящего сборника * этот вопрос подвергнут исследованию при помощи макетов искусственных следов. В настоящей работе данный вопрос рассматривается на примере реальных следов частиц. Оба метода приводят к аналогичным результатам. Концентрация зерен вуали и зерен в следах оказывается зависящей от условий проявления; некоторые относящиеся сюда результаты будут рассмотрены в конце работы.

§ 1. Распределение зерен вуали и зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности

В прямолинейных следах частиц, энергия которых значительно превышает уровень, соответствующий минимальной ионизации, наблюдались отдельные отрезки (пробелы) с весьма малым

* См. статью, 17, стр. 157.

количеством проявленных зерен. Эти наблюдения проводились на эмульсии Кодак NT4 толщиной 200 μ . Распределение плотности зерен вдоль следа частицы минимальной ионизирующей способности зависит от двух факторов: 1) от распределения наиболее чувствительных зерен вдоль следа частицы и 2) от ионизирующей способности частицы; если энергия частицы достаточно велика, ее

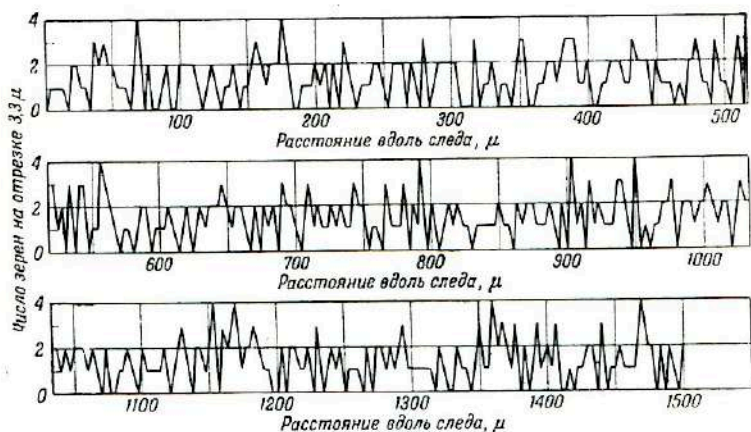


Рис. 1. Число зерен на отрезке длиной 3,3 μ на различных расстояниях вдоль следа.

ионизирующая способность может считаться постоянной величиной для значительной части ее траектории. Таким образом, плотность зерен зависит только от числа и распределения наиболее чувствительных зерен.

При визуальном наблюдении часто казалось, что пробелы, наблюдавшиеся в прямолинейных следах, достигали в длину примерно 10 μ и повторялись каждые 20 μ . При исследовании следов подсчитывалось число зерен на каждые 3,3 μ . Таким образом, выбранный «размер счетной ячейки» был приблизительно равен $1/6$ периода. Это позволяло проверить, была ли периодичность истинной или кажущейся.

Подсчет зерен проводился на следе, который начинался от поверхности эмульсии и проходил 1 500 μ до его выхода из нижней части эмульсии. Результаты этих подсчетов приведены на рис. 1; на оси ординат отложено число зерен, сосчитанных на 3,3 μ следа, а на оси абсцисс — расстояние вдоль следа в микронах. Полученное распределение не обнаруживает каких-либо признаков периодичности. Это подтверждается тем, что в распределении (вдоль следа) промежутков, свободных от зерен, нет никакой закономерности.

Если можно утверждать, что число зерен на ячейку длиной $3,3 \mu$ не зависит от расстояния вдоль следа, то отсюда можно заключить, что пространственное распределение зерен вдоль следа совершенно случайно и никакая периодичность невозможна. Для исследования распределения числа зерен вдоль следа был использован следующий метод: 1) измерялось число ячеек длиной $3,3 \mu$, содержащих n зерен, для $n = 0, 1, 2, 3$ (это дает общее распределение зерен вдоль следа); 2) распределение числа зерен в ячейках, примыкающих к ячейкам, содержащим n зерен, измерялось в отдельности для $n = 0, 1, 2, 3$. Если эти последние распределения тождественны общему распределению 1, следовательно, число зерен на ячейку в $3,3 \mu$ не зависит от расстояния вдоль следа. Общее распределение 1 и четыре распределения 2 для $n = 0, 1, 2$ и 3 зерен приведены в следующей таблице:

Число зерен на ячейку		0	1	2	3	4
		доля ячеек с данным числом зерен, %				
Общее распределение 1		20	36	31	10	2
Распределение 2	$n = 0$	12	37	33	15	3
	$n = 1$	22	38	32	7	1
	$n = 2$	23	37	27	10	2
	$n = 3$	30	28	26	11	5

Статистический критерий показывает, что эти пять распределений взяты из одной общей совокупности. Было найдено, что во всех распределениях 2 распределение зерен на одной стороне ячейки, содержащей n зерен, было таким же, как распределение зерен на другой стороне той же ячейки.

Этот результат показывает, что число зерен на ячейку не зависит от числа зерен в соседних ячейках; следовательно, распределение зерен вдоль следа частицы с минимальной ионизацией совершенно случайно.

Пусть k — максимальное число проявленных зерен, вмещающихся в ячейку длиной $3,3 \mu$. Тогда можно представить, что ячейка состоит из k мест, которые могут быть заняты проявленными зернами. Если вероятность заполнения зерном каждого места ячейки одинакова и равна p , то среднее число зерен на ячейку $\bar{m} = pk$. Это предположение равной вероятности заполнения каждого места в ячейке эквивалентно, конечно, только что полученным результатам, т. е. тому, что число зерен (заполненных мест) на ячейку не зависит от числа зерен в соседних ячейках.

Если эти условия соблюдаются, то вероятность нахождения в ячейке 0, 1, 2, 3, 4 зерен дается последовательными членами биномиального разложения

$$(q + p)^k = {}^kC_r q^r p^{k-r},$$

где k — максимальное число зерен в ячейке, kC_r — общий биномиальный коэффициент, p — вероятность заполнения зерном какого-либо места в ячейке и q — вероятность того, что это самое место останется незанятым, т. е. $q = 1 - p$.

Наблюдаемое среднее число зерен в ячейке $\bar{m} = 1,33$, а максимальное число зерен в ячейке $k = 5$. Следовательно,

$$p = \bar{m}/k = 0,266.$$

Вероятность того, что ячейка будет содержать 0, 1, 2, 3, ... зерен, дается последовательными членами разложения

$$(q + p)^n \text{ или } (0,734 + 0,266)^5.$$

Вычисленное и наблюдаемое распределение числа зерен на ячейку изображено в виде гистограммы на рис. 2. Они почти совпадают и показывают, что распределение числа зерен на ячейку

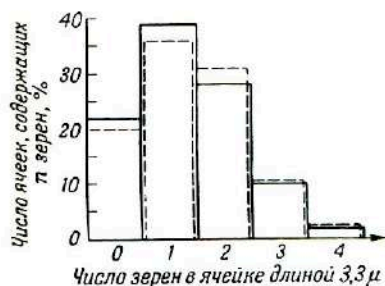


Рис. 2. Вычисленное и наблюдаемое распределение числа зерен на ячейку длиной $3,3 \mu$ вдоль следа частицы минимальной ионизирующей способности.

—— вычислено, ---- наблюдается.

вдоль следа частицы с минимальной ионизацией весьма близко к биномиальному распределению.

След частицы с минимальной ионизирующей способностью, для которого было найдено чисто случайное пространственное распределение и почти биномиальное распределение чисел, проходил через эмульсию в определенном направлении. Если принять, что это направление является не преимущественным, а произвольным, то этот след может рассматриваться как пример типичного

следа частицы с минимальной ионизирующей способностью. В таком случае можно заключить, что пространственное распределение зерен вдоль следов частиц с минимальной ионизирующей способностью случайно, и так как эти следы идут в произвольных направлениях, то, следовательно, наиболее чувствительные зерна распределены случайно по объему эмульсионного слоя. Кроме того, случайное распределение обусловлено геометрическими соображениями, не связанными с чувствительностью эмульсионных микрокристаллов. Поэтому зерна вуали также должны быть распределены случайно по объему эмульсии.

Это исследование распределения зерен вдоль следов частиц минимальной ионизирующей способности подобно исследованию природы зернистости изображения в эмульсии для видимого света [1]. В этих опытах «равномерное» почернение слоя разбивалось на многочисленные маленькие равные участки. Оказалось, что распределение числа зерен близко совпадало с биномиальным распределением.

Факт случайного распределения зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности позволяет применять обычный статистический метод анализа тех отрезков следов, которые необходимо выбрать для получения данной точности определения плотности зерен. Измерение плотности зерен вдоль 1 000 μ следа даст точность в ± 5 зерен на 100 μ , что достаточно для обычного исследования ядерных эмульсий. Для более точной работы принят стандартный метод, в котором измеряют плотности зерен вдоль 1 000 μ на каждом из пяти следов. В этом случае точность соответствует ± 2 зерна на 100 μ . Нет никакого смысла измерять отрезки следов длиннее 10 000 μ .

§ 2. Видимость следов частиц минимальной ионизирующей способности в ядерных эмульсиях

Теоретическая зависимость между видимостью, вуалью и плотностью зерен. Легкость, с которой наблюдатель может различить след частицы минимальной ионизирующей способности, т. е. видимость следа, зависит от плотности зерен в следе, плотности вуали (фона), угла вхождения частицы в эмульсию и длины следа в поле зрения микроскопа. Кроме того, при наблюдении следов, которые не лежат в плоскости эмульсии, наблюдается кажущееся «движение» следов по мере просмотра все более глубоких слоев эмульсии. Это кажущееся движение сразу же указывает на присутствие следа. При теоретическом рассмотрении делается упрощающее предположение, что видимость зависит только от плотности зерен в следе и плотности вуали. Кроме того, принимается, что видимость следа на фоне вуали, во-первых, по существу не зависит от кажущегося размера зерна, при условии, что зерна достаточно хорошо видны, и, во-вторых, в основном не зависит от увеличения, если глубина фокуса микроскопа не меняется. Другими словами, принимается, что видимость следа зависит только от геометрического распределения зерен в следе и вуали.

Пусть при данном увеличении N будет числом зерен вуали на 1 см², а N^* — числом зерен на 1 см следа. Тогда видимость V будет функцией N и N^* :

$$V = f(N, N^*).$$

Изменим теперь увеличение в m раз, так, чтобы число зерен вуали на 1 см^2 стало N/m^2 , а число зерен на 1 см следа — N^*/m . Теперь видимость равна $f(N/m^2, N^*/m)$ и, согласно исходному предположению, она равна $f(N, N^*)$. Для этого необходимо, чтобы

$$V = f(N^*/N).$$

Для данной видимости имеем

$$N = kN^{*2},$$

где k — постоянная.

Экспериментальное определение зависимости между видимостью, вуалью и плотностью зерен. Двадцать ядерных пластинок, изготовленных из различных партий эмульсий, чувствительных к частицам минимальной ионизирующей способности, были обработаны по методу температурного цикла [2] и рассмотрены под микроскопом с 2-миллиметровым иммерсионным объективом и окуляром $10\times$. При помощи квадратной окулярной сетки и винта точной наводки микроскопа для каждой пластинки подсчитывалось среднее число зерен вуали в объеме $6,7 \times 6,7 \times 12 \text{ м}$, находящемся в центре эмульсии, и полученную величину принимали за меру средней плотности вуали. Плотность зерен в прямолинейных следах частиц минимальной ионизирующей способности измерялась посредством счета зерен на 100 м в отрезке длиной 1000 м каждого из пяти следов на каждой пластинке.

Таким методом было найдено, что для 20 пластинок плотность вуали колебалась от 1,5 до 10 зерен в единице объема, а плотность зерен в следах — от 20 до 45 зерен на 100 м . Десять из пластинок располагались в порядке видимости следов 4 раза одним наблюдателем и по одному разу двумя другими наблюдателями. Из этих шести наблюдений определялось среднее положение каждой пластинки. Для пластинок, в которых наблюдалась наилучшая различимость следов частиц минимальной ионизирующей способности, видимость принималась равной 10, для пластинок с едва различимыми следами — 2, а видимость для промежуточных пластинок соответствовала их среднему положению.

Эти 10 пластинок использовались далее как шкалы для определения качества видимости 10 других пластинок. На рис. 3 изображена зависимость средней плотности вуали N от квадрата средней плотности зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности N^* для 20 эмульсий; около каждой точки приведено численное значение видимости.

Точки, отвечающие равным видимостям, не вполне точно ложатся на прямые, хотя этого можно было ожидать из теоретического выражения $N = kN^{*2}$. Это обусловлено главным образом

существованием некоторого интервала при оценке видимости и другими факторами, влияющими на видимость, которые не были учтены при выводе теоретического уравнения. Весь график можно разбить на ряд зон, сходящихся в начале координат. В первой зоне расположены точки, представляющие пластинки, в которых следы частиц минимальной ионизирующей способности различимы весьма легко. Видимость следов в этих пластинках более чем достаточна для того, чтобы считать эти пластинки

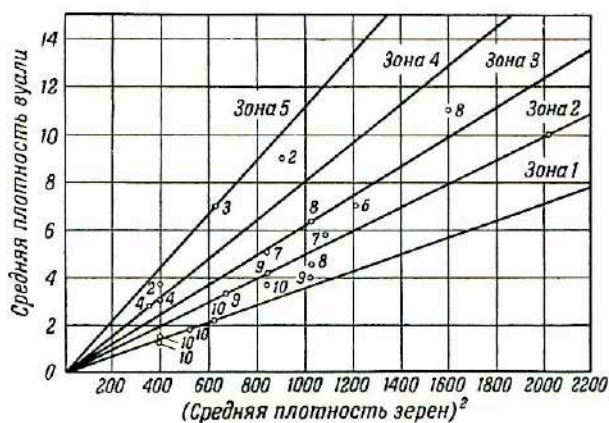


Рис. 3. Зависимость средней плотности вуали (число зерен вуали в единице объема) N от квадрата средней плотности зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности N^* (число зерен на 100μ).

Зона 1 — очень хорошая видимость; зона 2 — удовлетворительная видимость; зона 3 — слабая видимость; зона 4 — следы едва различимы; зона 5 — следы неразличимы.

удовлетворительно передающими следы частиц минимальной ионизирующей способности. Видимость следов в пластинках второй зоны как раз лежит на границе видимости, необходимой для удовлетворительного обнаружения частиц минимальной ионизирующей способности. К четвертой зоне относятся пластинки, в которых следы частиц минимальной ионизирующей способности едва различимы на фоне вуали.

График, изображенный на рис. 3, показывает, что при плотности вуали, равной 1 зерну в единице объема, плотность зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности должна достигать минимум 17 зерен на 100μ для того, чтобы видимость была хорошей. Следы, содержащие меньше 12 зерен на 100μ , не могут быть различимы как таковые даже при столь низкой плотности вуали. При высокой плотности зерен вуали, например 8 зерен в единице объема, средняя плотность зерен в следах должна

достигать минимум 43 зерен на 100μ для хорошей видимости, и при плотности ниже 30 зерен на 100μ следы уже не различимы.

Таким образом, для каждой плотности вуали существует минимальная плотность зерен в следах, ниже которой следы не различимы.

§ 3. Плотность зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности и число зерен вуали в ядерных эмульсиях при различной длительности проявления

Пластины толщиной 200μ , политые экспериментальной эмульсией А, проявлялись рекомендованным метоловым проявителем по методу температурного цикла [2]. Сначала пластины помещались в проявитель при 5° на 45 мин., затем температура проявителя была доведена до 21° и пластины проявлялись в течение 10, 20, 30, 50, 60 и 70 мин. Изменение степени проявления с глубиной эмульсии измерялось при помощи микроскопа

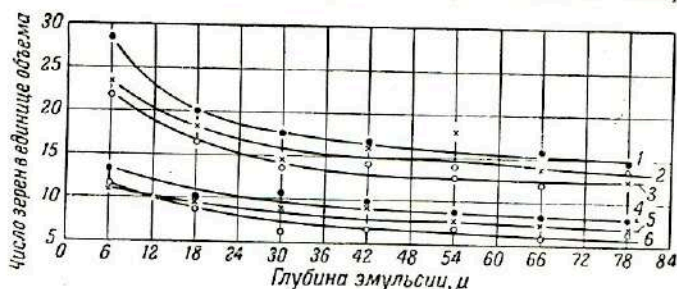


Рис. 4. Зависимость плотности вуали от глубины в слое эмульсии для различной длительности проявления после предварительной пропитки при 5° в течение 45 мин.

Кривая 1—70 мин., кривая 2—60 мин., кривая 3—50 мин., кривая 4—30 мин., кривая 5—20 мин., кривая 6—10 мин.

с 2-миллиметровым иммерсионным объективом и окуляром $20\times$ с квадратной окулярной сеткой. Сторона наименьшего квадрата сетки соответствовала $6,7 \mu$ эмульсии. Число зерен вуали, находившихся в объеме (равном $6,7 \times 6,7 \times 12 \mu$) обработанной эмульсии, измерялось для каждого последовательных 12μ толщины эмульсии, начиная от поверхности. На рис. 4 показана зависимость числа зерен вуали в указанной единице объема от глубины обработанной эмульсии для 10, 20, 30, 50, 60 и 70 мин. проявления. Можно видеть, что для длительности проявления до 30 мин. поверхностные слои эмульсии содержат немного больше зерен вуали, чем остальная часть эмульсии; однако проявление по всему объему эмульсии весьма равномерно. Для 50, 60 и 70 мин. проявления плотность зерен вуали в поверхностном слое

значительно больше, чем в глубине, и равномерность проявления уменьшается с глубиной.

Для сравнения плотностей зерен вуали при различном времени проявления в качестве меры средней плотности зерен вуали было принято среднее число зерен, находившееся в объеме $6,7 \times 6,7 \times 12$ р, расположенном в средней плоскости эмульсионного слоя (в середине между поверхностью и основанием слоя). Такой метод был выбран потому, что результат его применения не зависел от слабых колебаний толщины эмульсии, и потому, что во всех случаях в центральной части эмульсии проявление было достаточно равномерно. На рис. 5 показано изменение средней плотности зерен вуали со временем проявления. Можно видеть, что увеличение длительности проявления от 30 до 60 мин. ведет к увеличению количества зерен вуали в единице объема на 50 %.

Средняя плотность зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности определялась на 1 000-микронных отрезках каждого из 5 следов для 10, 30 и 50 мин. проявления. Если

время проявления превышало 50 мин., то на пластинках появлялись пятна, которые совместно с высокой вуалью препятствовали различению следов частиц минимальной ионизирующей способности. На рис. 6 показано изменение плотности зерен в следах частиц со временем проявления. Можно видеть, что увеличение длительности проявления от 30 до 60 мин. вызывает примерно 20 %-ное увеличение плотности зерен в следах.

Так как при увеличении времени проявления для рассматриваемой эмульсии число зерен вуали увеличивается скорее плотности зерен в следах, то можно ожидать существования оптимальной длительности проявления, достаточной для легкого различения следов частиц минимальной ионизирующей способности.

В связи с этим следы в пластинках, которые проявлялись в течение 10—70 мин. с интервалом в 5 мин., были рассмотрены

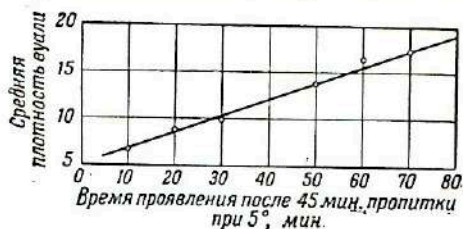


Рис. 5. Зависимость средней плотности зерен вуали от длительности проявления (измерено на глубине, соответствующей расстояниям от 60 до 150 μ от поверхности необработанной эмульсии).



Рис. 6. Зависимость плотности зерен в следах частиц минимальной ионизирующей способности от длительности проявления.

рядом наблюдателей, и каждый наблюдатель отобрал пластинку с наилучшим различением. Таким способом было найдено, что оптимум лежит между 40 и 50 мин. Это время проявления несколько изменяется от одной партии пластинок к другой.

Влияние времени проявления на видимость следов в ядерной эмульсии. Пластинки, политые другой экспериментальной эмульсией, В, проявлялись 5, 10, 15, 20, ... 80 мин. после предварительной пропитки при 5° в течение 45 мин. Видимость следов в каж-



Рис. 7. Вычисленная и наблюдаемая видимость для различной длительности проявления после пропитки при 5° в течение 45 мин.

дой пластинке определялась при помощи графика, изображенного на рис. 3, и пластинок, служивших для построения этого графика. На рис. 7 показана зависимость вычисленной и наблюдаемой видимости следов от времени проявления пластинок. Вначале наблюдаемая видимость медленно возрастает со временем проявления, пока при 45—50 мин. не появляются пятна, вызванные проявлением. После это-

го наблюдаемая видимость быстро уменьшается вследствие дальнейшего быстрого усиления пятнистости, а вычисленная видимость продолжает медленно расти. Общий вид кривой видимости — длительность проявления одинаков для всех эмульсий NT, однако оптимальная длительность проявления может изменяться от партии к партии в зависимости от момента появления пятен, вызванных проявлением. Для эмульсии В оптимальная длительность проявления равна 40—50 мин., что совпадает с результатами для экспериментальной эмульсии А. Причиной такого совпадения служит одновременное появление пятнистости при проявлении обеих эмульсий.

Следует отметить, что результаты, описанные в последнем разделе этой статьи и показанные на рис. 4—7, относятся к специальным экспериментальным эмульсиям и не обязательно сохраняют силу для всех остальных ядерных эмульсий. Характеристики данного специального типа ядерной эмульсии могут меняться от партии к партии, но в общем будут подобны описанному выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Selwyn E. W. H., Photogr. J., **79**, 513 (1939).
2. Dilworth C., Occhialini G. P. S., Payne R. M., Nature, **162**, 102 (1948).