

Чувствительность и гранулометрические свойства ядерных фотографических эмульсий.

Рабочее совещание «Перспективы метода ядерной эмульсии»
10-11 июня 2013 г., Дубна.

В.А. Дитлов

Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова.
117259, Москва, ул. Большая Черёмушкинская, 25.

Введение.

Фотоэмульсионные методы детектирования многие десятилетия успешно конкурируют с большим количеством быстро развивающихся методов детектирования к которым, например, относятся разнообразные автоматические и электронные методы. В то же время фотоэмульсионные методы тоже уже на протяжении многих десятилетий развиваются в направлении автоматизации измерений. Постановка настоящей работы была инициирована работами в ОАО «Славич» по созданию новых ядерных фотоматериалов и предназначена главным образом для технологов-эмульсионеров. Цель настоящей работы заключается в следующих пунктах:

1. Отработка методов автоматического анализа гранулометрических свойств не проявленной эмульсии;
2. Изучение возможности анализа гранулометрических свойств эмульсий с помощью аппроксимации изображений микрокристаллов эллипсами;
3. Сравнение гранулометрических свойств нескольких эмульсий;
4. Описание зависимости чувствительности ядерной фотоэмульсии от содержания бромистого серебра, от среднего размера микрокристаллов и эллиптичности.
5. Проведение расчетов зависимости чувствительности рассмотренных эмульсий от характеристических ограниченных потерь для использования в калибровочных экспериментах.

1. Чувствительность ядерной фотографической эмульсии.

Микрокристаллы (МК) ядерной фотоэмульсии имеют геометрическую форму, близкую к форме сферы, средний радиус которых обозначим через a . Под продольной плотностью трека заряженной частицы с остаточным пробегом s понимается количество зерен $n^+(s)$, проявленных в ядерной фотоэмульсии на отрезке трека в сто микрон. Значение плотности $n^+(s)$, измеряемое после прохождения через фотоэмульсию однозарядной частицы с энергией E_r в релятивистском минимуме ионизации, характеризует чувствительность ядерной фотоэмульсии:

$$n_r = n^+(s_r) \quad (1)$$

Здесь $s_r = s(E_r)$.

Разделим все микрокристаллы эмульсии на q групп, пусть в каждой группе они имеют одинаковые радиусы a_i и их количество на отрезке в один микрон равно $n_{0,i}$. Тогда количество проявленных зерен на ста микронах фрагмента трека опишется выражением:

$$n^+(s) = 100 \sum_{i=1}^q n_{0,i} \cdot P^+(s, a_i) \quad 1/100 \text{ мкм}, \quad (2)$$

Полное количество микрокристаллов, встреченных частицей или ионом на ста микронах трека, будет равно:

$$n_0 = 100 \sum_{i=1}^q n_{0,i} \quad 1/100 \text{ мкм} \quad (3)$$

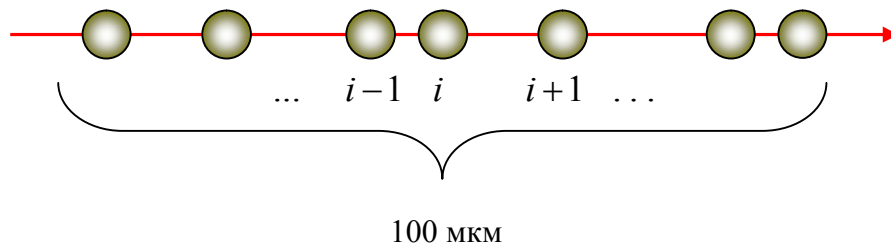


Рис.1. Количество эмульсионных микрокристаллов n_0 на прямолинейном отрезке в 100 мкм.

Количество встреченных частицей микрокристаллов $n_{0,i}$ i -ой группы на ста микронах пробега может быть выражено через количество микрокристаллов $n_{МК,i}$ i -ой группы в одном кубическом микроне эмульсии и через их поперечное сечение $\sigma_i = \pi \cdot a_i^2$:

$$n_{o,i} = n_{MK,i} \cdot \sigma_i \quad 1/100 \text{ мкм} \quad (4)$$

Тогда выражение (3) можно переписать следующим образом:

$$n_o = 100 \cdot \sum_{i=1}^q n_{MK,i} \cdot \sigma_i \quad 1/100 \text{ мкм} \quad (5)$$

Количество микрокристаллов i -ой группы с радиусами a_i в единичном объеме сухой фотоэмульсии находится из формулы:

$$n_{MK,i} = \frac{m_{AgBr,i}}{\frac{4}{3} \rho_{AgBr} \pi \cdot a_i^3} \quad 1/\text{мкм}^3 \quad (6)$$

Здесь $m_{AgBr,i}$ - суммарная масса микрокристаллов с радиусами a_i в этом объеме. Просуммировав выражение (6), можно найти количество всех микрокристаллов в единице объема сухой эмульсии:

$$n_{MK} = \frac{3}{4 \rho_{AgBr} \pi} \sum_{i=1}^q \frac{m_{AgBr,i}}{a_i^3} \quad 1/\text{мкм}^3 \quad (7)$$

С помощью формулы (6) можно массу i - группы МК выразить их количество в этой группе:

$$m_{AgBr,i} = \frac{4}{3} \rho_{AgBr} n_{MK,i} \cdot \pi \cdot a_i^3 \quad \text{г/мкм}^3 \quad (8)$$

Просуммировав выражение (8) по i , можно получить количество бромистого серебра в единице объёма сухой эмульсии:

$$m_{AgBr} = \frac{4}{3} \rho_{AgBr} \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^q n_{MK,i} \cdot a_i^3 \quad \text{г/мкм}^3 \quad (9)$$

Если предположить, что все микрокристаллы имеют одинаковые размеры a , т.е.

$q=1$, то из формул (5) и (6) можно получить $n_o = 100 \cdot m_{AgBr} \cdot \frac{\pi \cdot a^2}{\frac{4}{3} \pi \cdot a^3 \cdot \rho_{AgBr}}$ и,

следовательно, количество микрокристаллов, встречаемых частице на 100 км пути, в этом случае прямо пропорционально содержанию бромистого серебра в единице объёма сухой эмульсии и обратно пропорционально размеру микрокристаллов:

$$n_o = 75 \cdot \frac{m_{AgBr}}{\rho_{AgBr} a} \quad 1/100 \text{ мкм} \quad (10)$$

Эту формулу можно использовать для оценки верхнего предела количества бромистого серебра, которое может содержаться в единице объема сухой фотоэмульсии в виде таких одинаковых сфер. Этот предел находится из геометрического рассмотрения доли объема куба, которую занимает вписанная в него сфера (см. Рис.2). Максимальная

объемная доля бромистого серебра в фотоэмульсии определяется отношением объема вписанного в куб шара к объему этого куба:

$$\frac{V_{sphere}}{V_{cube}} = \frac{4}{3} \pi a^3 \cdot \frac{1}{(2 \cdot a)^3} = \frac{\pi}{6} = 0.524 \quad (11)$$

Кубиками одинакового размера можно заполнить весь объем фотографического эмульсионного слоя, поэтому отношение объема, занятого бромистым серебром, к объему эмульсии будет равно этой же величине $\frac{V_{AgBr}}{V_{emul}} = 0.524$. Следовательно, в одном кубическом сантиметре бромистое серебро занимает объем $V_{AgBr} = 0.524 \text{ см}^3$, а на желатин приходится объем $V_{gel} = 0.476 \text{ см}^3$.

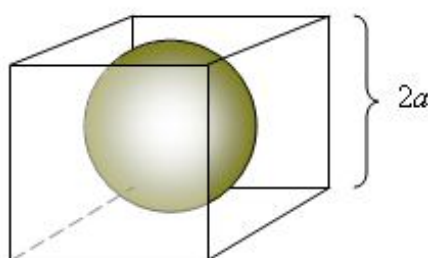


Рис. 2. Максимальная объёмная доля бромистого серебра фотоэмульсии со сферическими микрокристаллами определяется отношением объема сферы, вписанной в куб к объему этого куба.

Зная максимальную долю объема, занимаемого бромистым серебром в объеме фотоэмульсии, можно найти его максимальное весовое содержание в одном кубическом сантиметре:

$$m_{AgBr} = \rho_{AgBr} \cdot V_{Sphere} \quad \text{г/см}^3 \quad (12)$$

Подставляя значения плотности бромистого серебра $\rho_{AgBr} = 6.47 \text{ г/см}^3$, получаем $m_{AgBr} = 3.390$ грамм в 1 см^3 эмульсии. Если допустить, что плотность различных желатин лежит в интервале $\rho_{gelat} = 1.1 \div 1.4 \text{ г/см}^3$, то для количества массы желатина в единице объема эмульсии при максимальном количестве бромистого серебра получается следующий интервал значений:

$$m_{gelatin} = 0.52 \div 0.67 \quad \text{г/см}^3 \quad (13)$$

Что соответствует интервалу возможных значений плотности эмульсии:

$$\rho_{emuls} = m_{AgBr} + m_{gelatin} = 3.39 \div 4.05 \quad \text{г/см}^3; \quad (14)$$

Весовая концентрация бромистого серебра $c = m_{AgBr} / \rho$ г./г. для эмульсий с максимально возможным содержанием бромистого серебра оказывается в интервале:

$$C = 0.866 \div 0.835 \text{ г./г.} \quad (15)$$

Согласно данным М.Ф.Родичевой /1/ плотность ядерной фотоэмульсии тип-Р2 равна $\rho_{AgBr} = 3.89 \text{ г./см}^3$ и в одном кубическом сантиметре эмульсии содержится $m_{AgBr} = 3.188$ грамм бромистого серебра. Это количество бромистого серебра чуть меньше максимально возможного и поэтому весовая концентрация $AgBr$ $C_{R2} = 0.82$ г./г фотоэмульсии тип-Р2 оказывается ниже величин интервала (15). Используя эти значения можно найти, что

бромистое серебро занимает $\frac{V_{AgBr}}{V_{Cube}} = 0.493$ долю объёма эмульсии фотоэмульсии тип-Р2,

объемная доля желатина составляет $\frac{V_{Gelatin}}{V_{Cube}} = 0.507$, плотность желатина равна

$\rho_{Gelatin} = 1.384 \text{ г./см}^3$. Все найденные величины совпадают с приведенными данными в работе /2/.

На Рис.3 в качестве примера приведены расчетные зависимости количества встречаемых частицей зерен n_0 (три верхние наклонные линии) на ста микронах прямолинейного пути от количества серебра в кубическом сантиметре фотоэмульсии для трех эмульсий со средними размерами микрокристаллов $a = 0.08, 0.145$ и 0.25 мкм. Значение 0.145 взято из работы К.С. Богомолова /2/ для эмульсии тип-Р2. Верхней горизонтальной штриховой линией обозначено количество микрокристаллов, встречаемых частицей в этой эмульсии. Три нижние наклонные прямые линии изображают зависимость количества проявленных зерен n в релятивистском минимуме ионизации однозарядной частицы при указанных выше трех значениях радиусов микрокристаллов. Нижняя горизонтальная пунктирная линия проведена для n проявленных зерен эмульсии тип-Р2. Предполагалось, что все эмульсии с разным содержанием серебра и указанными радиусами микрокристаллов сенсibilизированы по методике эмульсии тип-Р2.

Вероятность проявления микрокристаллов рассчитывалась с помощью флуктуационной теории фотографического действия слабоионизирующих частиц К.С. Богомолова /2/. Согласно этой теории только приповерхностный слой сферического микрокристалла $AgBr$ содержит центры чувствительности, превращающиеся под действием радиации в центры проявления (Рис.4). Средняя длина пути частицы внутри поверхностного слоя при прохождении через микрокристалл как функция радиуса a описывается формулой:

$$I(a) = \begin{cases} a \geq b: & 4b \cdot \left(1 - \frac{b}{a} + \frac{b^2}{3 \cdot a^2} \right) \\ a \leq b: & \frac{4}{3} b \end{cases} \quad (16)$$

Зависимость количества встречаемых микрокристаллов n_0 и проявленных зерен n на 100 мкм для трех радиусов a от содержания бромистого серебра в см^3 сухого слоя.

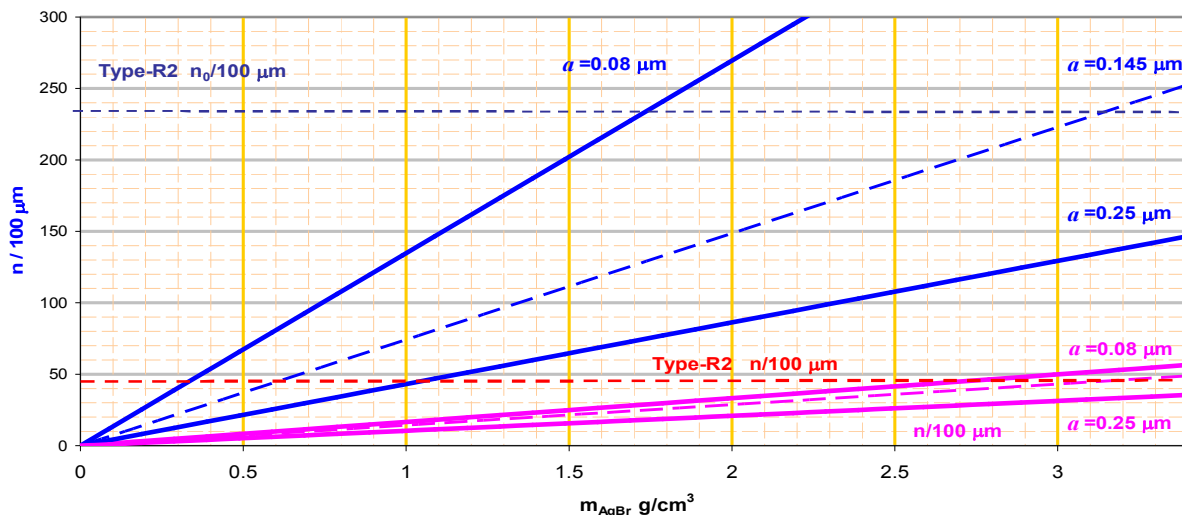


Рис.3 Зависимость количества встречаемых микрокристаллов n_0 и проявленных зерен n на 100 мкм пути в релятивистском минимуме ионизации однозарядной частицы от содержания бромистого серебра m_{AgBr} в кубическом сантиметре сухой трех эмульсий с радиусами МК $a = 0.08, 0.145$ и 0.25 мкм, соответственно.

Отклик МК ядерной фотоэмульсии тип-P2 описывается одноударной моделью и вероятность проявления микрокристалла после прохождения через него однозарядной частицы равна:

$$P^+(s, a) = 1 - e^{-w_r(a) \frac{REL_{5keV}(s)}{REL_0}} \quad (17)$$

$$w_r(a) = 0.215 \frac{l(a)}{l(a_{R2})} \quad (18)$$

Где $REL_{5keV}(s)$ - ограниченные потери энергии в кэВ/мкм, выделенной частицей на отрезке 1 мкм в микрокристалле $AgBr$. В $REL_{5keV}(s)$ учитываются только дельта δ -электроны, энергия которых не больше пяти кэВ. Как показано К.С.Богомоловым, δ -электроны более высоких энергий вылетают из МК не успевая создать в нем центр проявления [2]. REL_0 - характеристические продольные потери, определяющие чувствительность отдельного микрокристалла: чем меньше их значение, тем выше

чувствительность микрокристалла. Минимизация этой величины достигается сенсбилизацией ядерной фотоэмульсии. Величина REL_0 может быть найдена из калибровочных экспериментов с однозарядными частицами известных энергий. $w_r(a)$ - частота эффективных актов ионизации в ядерной фотоэмульсии тип-P2 с радиусами МК $a_{R2} = 0.145$ мкм в релятивистском минимуме ионизации E_r , $REL_0 = REL_{5keV}(E_r)$. В формуле (18) использовано значение частоты фотографически эффективных актов ионизации в МК эмульсии тип-P2, найденное в /2/ для однозарядной частицы в релятивистском минимуме ионизации с остаточным пробегом s_r .

Функция $P^+(a)$ изображена на Рис.5 для вероятности появления отклика МК после прохождения через эмульсию однозарядной частицы с энергетическими потерями в релятивистском минимуме $s_r = s(E_r)$.

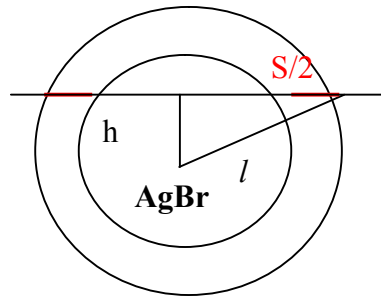


Рис. 4. Только скрытое изображение внутри внешнего слоя толщиной $b = 0.078$ мкм сферического микрокристалла AgBr ядерной эмульсии является центром проявления микрокристалла при стандартном проявлении фотоэмульсии /2/.

Число встреченных частицей микрокристаллов зависит от количества бромистого серебра и от величины их радиусов $n_0 = n_0(a)$. Верхняя кривая на рис.6 дана для зависимости $n_0(a)$. Нижняя кривая описывает зависимость от радиуса a количества способных к проявлению микрокристаллов $n(a)$ для эмульсии с максимально возможным содержанием бромистого серебра m_{AgBr} после прохождения через эмульсию однозарядной частицы в релятивистском минимуме ионизации.

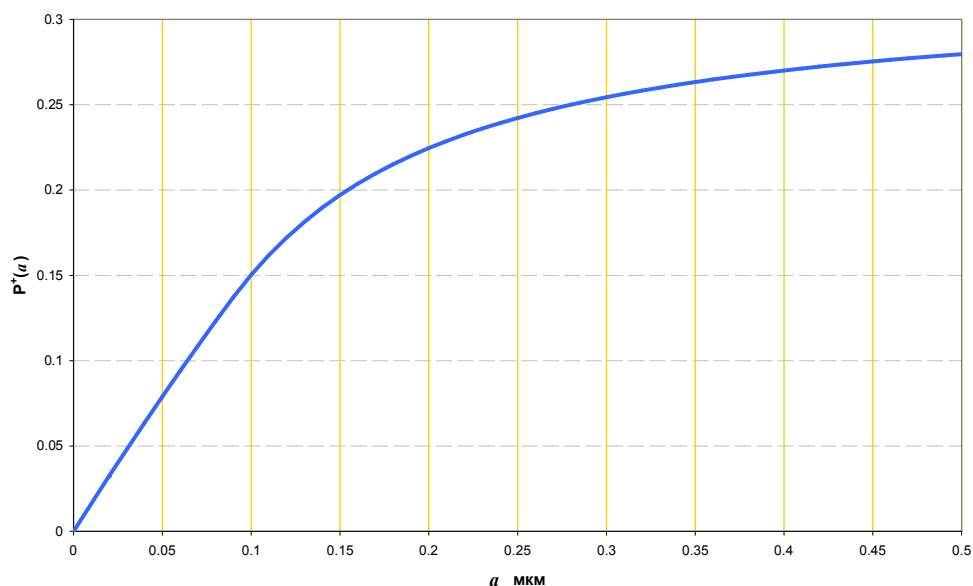


Рис. 5. Зависимость вероятности проявления микрокристалла в релятивистском минимуме ионизации однозарядной частицы от его радиуса.

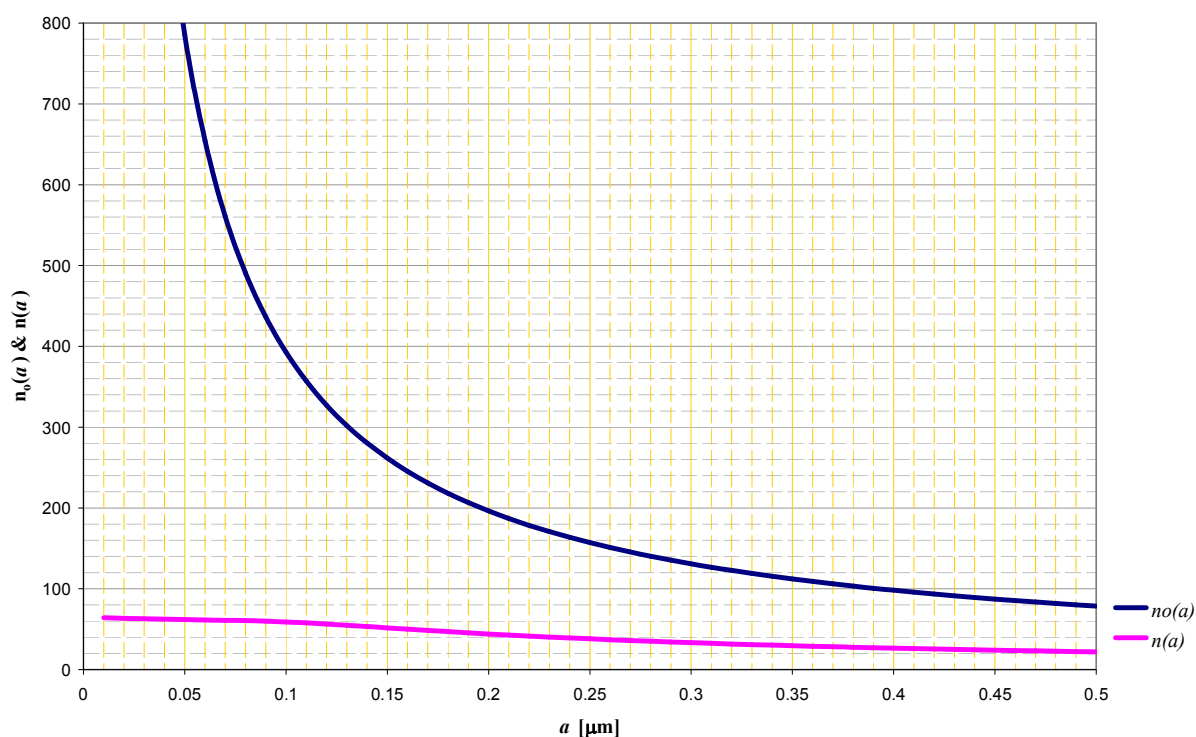


Рис. 6. Зависимости $n_0(a)$ количества встречаемых частицей микрокристаллов на 100 мкм пробега в фотоэмульсии от радиусов микрокристаллов и количества проявленных зерен $n(a)$ на 100 мкм после прохождения через нее однозарядной частицы в релятивистском минимуме ионизации при максимальном содержании бромистого серебра.

На рисунке 7 приведена зависимость количества зерен, проявленных после прохождения через фотоматериал однозарядной частицы в релятивистском минимуме ионизации, от размеров микрокристаллов a и от содержания в фотоэмульсии бромистого

серебра m_{AgBr} . Очевидно, что чем большее количество серебра, тем большее количество встречаемых частиц микрокристаллов. С другой, стороны, чем меньше размеры микрокристаллов, тем меньше вероятность их проявления. Форма поверхности $n_{grains}(m_{AgBr}, a)$ формируется под влиянием этих двух противоположных факторов.

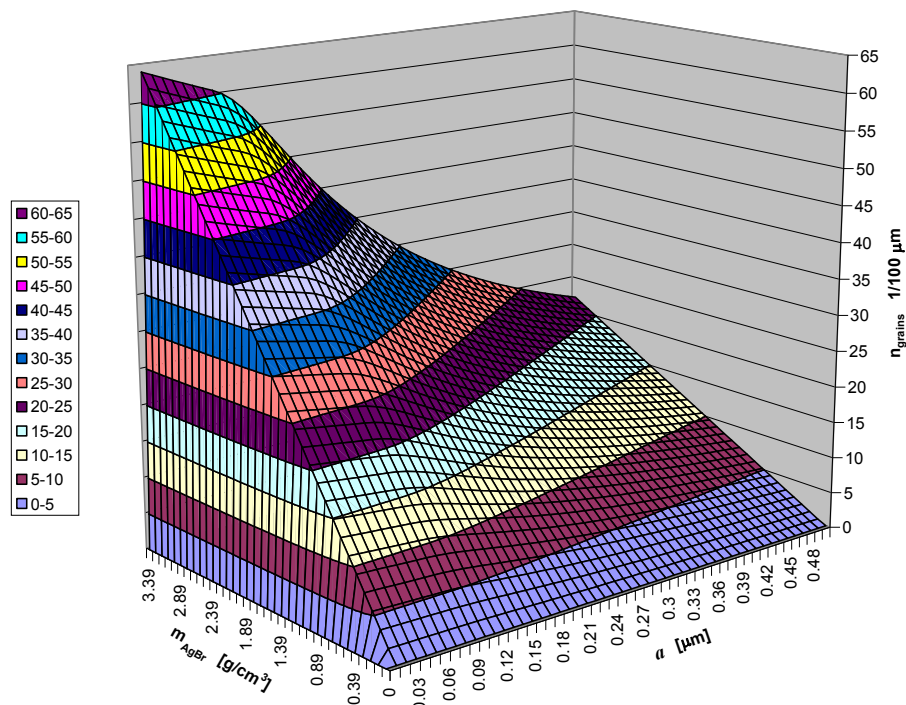


Рис. 7. Зависимость количества проявленных зерен $n_{grains}(m_{AgBr}, a)$ в релятивистском минимуме ионизации однозарядной частицы от содержания бромистого серебра m_{AgBr} и от радиуса микрокристаллов a при выполнении условий сенсбилизации, применяемых для эмульсии тип-Р2.

2. Автоматическая обработка микроскопических фотоснимков не проявленной фотоэмульсии с целью анализа гранулометрических свойств микрокристаллов.

В предыдущем параграфе предполагалось, что все эмульсионные микрокристаллы $AgBr$ имеют сферическую форму. В действительности же их гранулометрические свойства могут несколько отличаться, так их форма в той или иной степени отличается от сферы. Изучать форму и распределение микрокристаллов по размерам можно с помощью компьютерной обработки микроснимков специально приготовленных образцов фотоэмульсии. Приближенно форму микрокристаллов, видимых на снимках, можно описывать эллипсами, большие оси которых далее обозначаются буквой D , а малые буквой d . Распределение микрокристаллов по размерам больших осей обозначим как $n_0(D)$, а распределение по размерам малых осей как $n_0(d)$. Отношение большой оси к

малой обозначим буквой $\eta = D/d$, а распределение МК по этому параметру обозначим как $f(\eta)$.

Основные проблемы, возникающие при автоматической обработке микрофотографий эмульсии, и принципы обработки были изложены в Дубне в 1998 году /3/. Для автоматического обнаружения и анализа микрокристаллов $AgBr$ на микрофотоснимках была разработана программа Poisk на языке C#. Эта программа вписывает в контуры найденных областей почернения эллипсы, строит распределения найденных областей по размерам больших и малых осей эллипсов. Для отбора областей почернения, наиболее похожих на изображение проявленного зерна использовались два критерия. Первый критерий применялся для оценки того, насколько хорошо границы найденных областей почернения описываются эллипсами. В качестве этого критерия использовалось среднее квадратичное отклонение граничных точек области почернения от точек контура вписанного эллипса:

$$\delta r = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\vec{R}_i - \vec{r}_i|^2}{|\vec{r}_i|^2}} \% ; \quad (19)$$

Где \vec{R}_i проведен из центра эллипса в пограничную точку i области почернения, а вектор \vec{r}_i проведен из центра эллипса до точки контура эллипса параллельно вектору \vec{R}_i . Это показано на Рис. 8. Эллипс вписывается таким образом, чтобы δr была минимальной. Параметр N обозначает количество граничных точек области почернения.

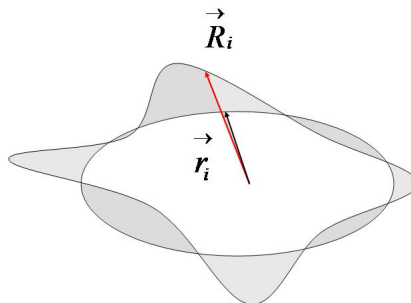


Рис. 8. Оценка среднее квадратичного отклонения границы области почернения от контура вписываемого в неё эллипса.

Ниже исследуются микрофотоснимки трех эмульсий:

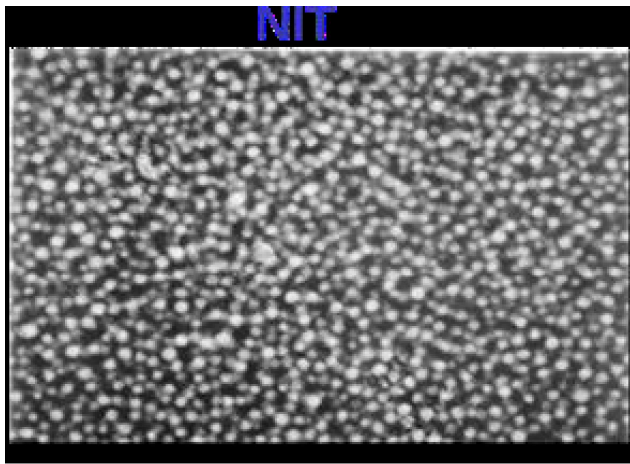
1. *NIT* - мелкозернистая японская эмульсия, разработана для экспериментов по поиску частиц темной материи /4/;
2. Образец *C9* разрабатываемой в ОАО «Славич» ядерной фотоэмульсии;
3. Образец *C12* разрабатываемой в ОАО «Славич» ядерной эмульсии.

На рис. 9.1-*a*, 9.2-*a* и 9.3-*a* приводятся микрофотографии микрокристаллов этих эмульсий, в той же последовательности. Снимок эмульсии *NIT* взят из работы /4/. Микрофотография образца *C9* с несколькими слоями микрокристаллов сделана с помощью электронного микроскопа в ИПХФ РАН г. Черноговка, а микрофотография образца *C12* с монослоем микрокристаллов получена Е.П. Сенченковым в МГУ после разбавления и напыления углерода на микрокристаллы фотоэмульсии. На микроснимках *NIT* и образца *C9* можно увидеть большое количество микрокристаллов, в то время как на снимке образца разбавленной эмульсии *C12* наблюдается гораздо меньшее количество МК. Поэтому снимки эмульсий *NIT* и *C9*, содержащие изображения большого количества МК, обрабатывались программой *POISK* в режиме одиночного кадра, а при исследовании эмульсии *C12* статистика компьютерных измерений была увеличена одновременным анализом пятнадцати микроснимков в режиме пакетной обработки.

Каждый микроснимок (*a*) на Рис.9 сопровождается гистограммой (*b*) распределения областей локальных почернений $\Delta n(\delta r)$ этого снимка по отклонениям δr от контура эллипсов. $\Delta n(\delta r)$ каждого столбика гистограммы равно количеству МК со значениями δr , укладывающимися в интервалы ширины столбика. Распределения всех трех эмульсий проходят через максимум и имеют длинный хвост в области больших значений отклонений δr .

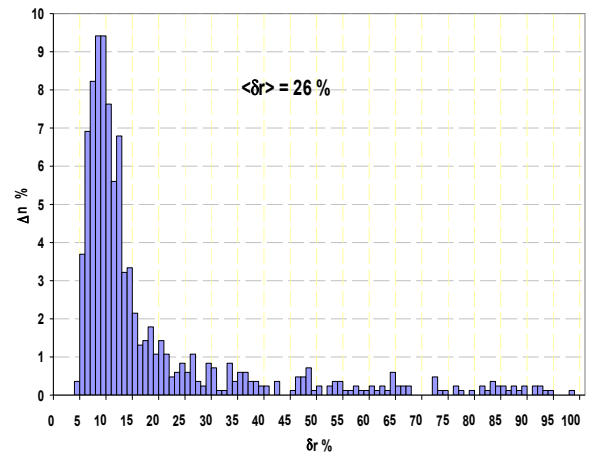
Большие значения δr могут формироваться несколькими факторами:

1. Контурные одиночных микрокристаллов отличаются от формы эллипсов;
2. Видимые контуры формируются несколькими микрокристаллами, которые не разделяются анализирующей программой *POISK* ;
3. Видимые контуры принадлежат конгломератам из нескольких МК, сросшимися в процессе перекристаллизации.
4. Видимые контуры образованы шумовыми включениями различной природы.



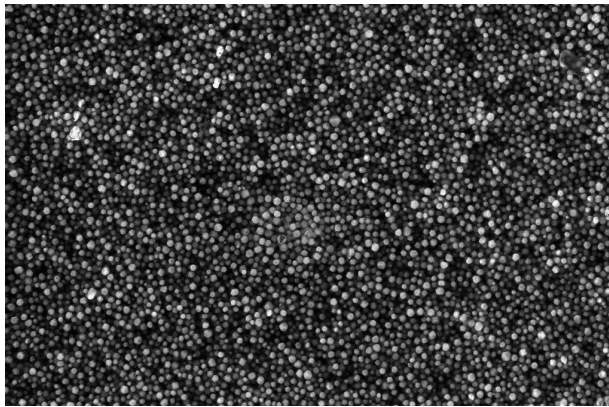
size 40 ± 9 nm
 density 2.8g/cc $\rightarrow V_{AgBr} : V_{gel} = 3 : 7$
 11 grains/ μ m

a.

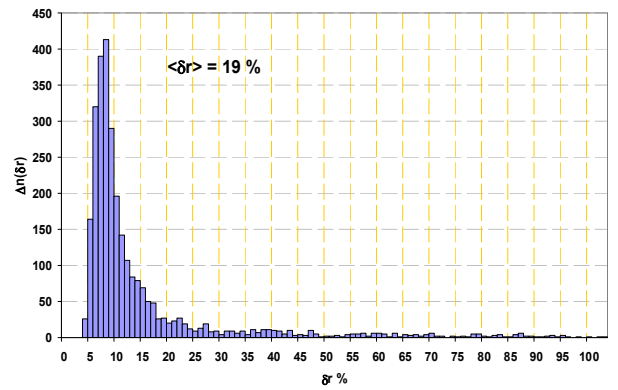


b. Распределение по отклонению МК от формы эллипса

Рис. 9.1. Ядерная фотоэмульсия NIT

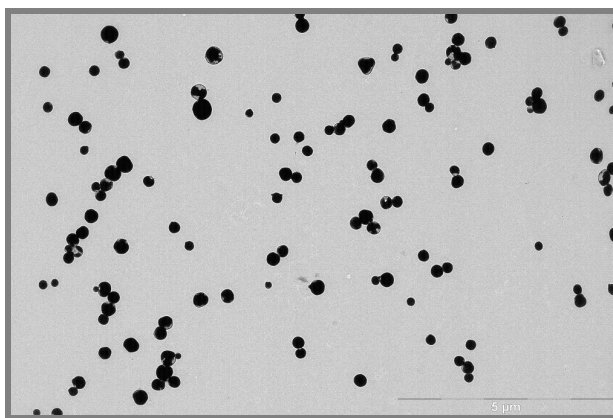


a.

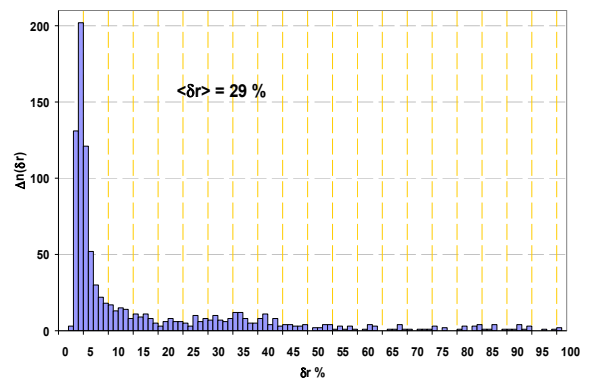


b. Распределение по отклонению МК от формы эллипса.

Рис. 9.2. Образец C9 ядерной фотоэмульсии.



a.



b. Распределение по отклонению МК от формы эллипса

Рис. 9.3. Образец C12 ядерной фотоэмульсии.

Естественно ожидать, что большая часть «хвостов» распределений Рис.9 сформирована третьим фактором. Наименьшее среднеквадратичное отклонение контуров областей почернения от контуров эллипсов имеет образец эмульсии C9 - $\langle \delta r \rangle = 19\%$, а наибольшее образец эмульсии C19 $\langle \delta r \rangle = 29\%$.

На кадрах рисунка 10 изображены контуры областей локальных почернений, полученные с помощью компьютерной обработки микроснимков трех эмульсий, ранее показанных на снимках рисунка 9. Внутри контуров нарисованы большие оси вписанных эллипсов, на кадрах показаны фрагменты с увеличенными изображений контуров. Если область почернения сформирована из нескольких МК, лежащих на одной прямой, то большая ось аппроксимирующего эллипса автоматически проводится вдоль цепочки слившихся изображений МК.

Перейдём к обсуждению диаграмм (b) рисунка 10. На плоскостях (D, d) этих диаграмм каждая i -я точка обозначает найденную область почернения, в контур которой вписан эллипс с осями D_i и d_i . Если бы все микрокристаллы имели строго сферическую форму, то все точки (D_i, d_i) лежали бы на одной прямой $D_i(d) = d_i$ с наклоном в 45 градусов. Если бы ещё, кроме того, МК имели одинаковые размеры, то все они лежали бы в одной точке $D_i = d_i = \langle D \rangle$ плоскости (D, d) . Таким образом, распределение по размерам приводит к вытягиванию точки в прямую линию, а разброс отношений осей эллипсов η_i приводит к разбросу координат точек в верхней части плоскости $D > d$.

На каждой диаграмме (b) через начало координат проведены четыре наклонные прямые штриховые линии. Тангенсы наклона линий равны отношениям больших и малых осей эллипсов областей почернения, лежащих на этих прямых:

$$\eta_i = \frac{D_i}{d_i} \quad (20)$$

Тангенс наклона прямой №1 равен единице. Контуры областей почернения, соответствующих точкам этой прямой, являются окружностями с равными значениями $D_i = d_i$. Для точек на прямой №2 строго выполняется равенство $D_i = 1.2 \cdot d_i$, для точек прямой №3 имеет место $D_i = 2 \cdot d_i$, а на прямой №4 большие оси вписанных в области почернения в три раза больше малых осей: $D_i = 3 \cdot d_i$. Из сравнения диаграмм (b) Рис. 10 можно увидеть, что на снимке, сделанном с помощью метода реплик монослая микрокристаллов образца эмульсии C12, подавляющее количество точек (D_i, d_i) лежит между прямыми №1 и №2, т.е. границы подавляющего количества областей почернения аппроксимируются эллипсами, у которых максимальная разность между величинами

больших и малых осей не превышает двадцати процентов. При обработке снимков не разбавленных эмульсий *NIT* и *C9* изображения микрокристаллов накладываются друг на друга и поэтому не всегда удается отличить изображение конгломерата нескольких МК от слившихся изображений МК разных глубин эмульсионного слоя. В результате разброс точек (D_i, d_i) у этих эмульсий больше, чем у эмульсии *C12*

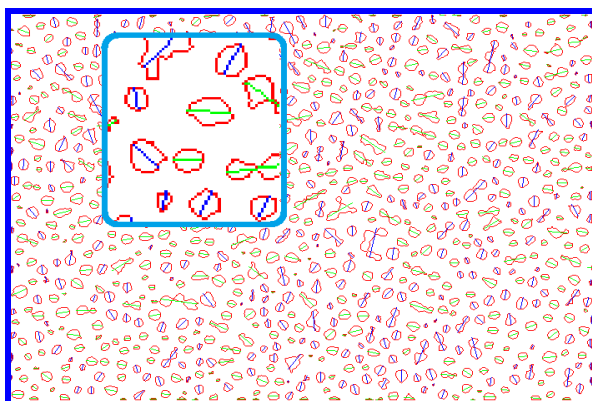
Точки плоскости (D, d) между прямыми линиями №1 и №3 соответствуют конгломератам МК и отдельным МК, у которых $D_i \leq 2 \cdot d_i$, а также областям почернения двух МК, которые программа *POISK* не смогла разбить на изображения отдельных МК. Заметна некоторая кластеризация точек (D_i, d_i) образцов *C9* и *C12* вокруг прямой №3, что указывает на заметную долю неразличимых групп или конгломератов из двух МК для этих эмульсий. Вероятность образования не разделяемых программой цепочек из мелких МК растет с уменьшением их размеров - точки (D_i, d_i) малых размеров областей почернения расположены довольно однородно и плотно в интервале $\eta \sim 1 \div 3$, особенно плотно для эмульсии *C9*. На основе анализа гистограмм (b) рисунка 9 можно допустить, что контур почернения является эллипсом, если $\delta r \leq \delta r_{Cr} = 50\%$. На кадрах Рис.11 показаны области локальных почернений с $\delta r > \delta r_{Cr}$, а на Рис.12 показаны области почернений с $\delta r \leq \delta r_{Cr}$.

Плохо аппроксимируемые эллипсами «забракованные» области почернения состоят в большей степени из неразделенных конгломератов более сложной конфигурации и с большим количеством МК, чем в конгломератах на кадрах Рис.12.

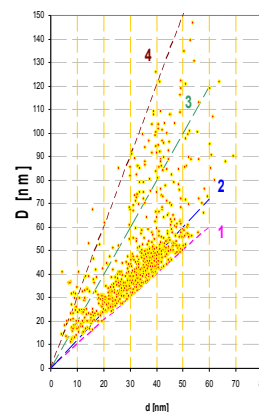
На кадрах рисунка 12 можно увидеть, что даже при отклонениях $\delta r \leq 50\%$ небольшое количество областей почернения соответствует слившимся изображениям двух и даже трех микрокристаллов. На гистограммах (b) рис.12 приведены распределения МК $f(\eta)$ по параметру неэллиптичности $\eta = D/d$ исследуемых ядерных фотоэмульсий. На «хвостах» всех трех распределений вблизи $\eta \sim 2$ заметны небольшие возвышения, что соответствует небольшим фракциям точек (D_i, d_i) вблизи наклонной прямой №3 диаграмм (b) рисунка 10. Большинство МК образца *C12* на гистограммах рисунков 10 и 11 имеют $\eta \leq 1.2$.

Произведем вторую сортировку и разделим оставшиеся области почернения с $\delta r \leq 50\%$ на две группы: с $h \leq 1.2$ (см. Рис.13) и $\eta > 1.2$ (см. Рис. 14). На всех дальнейших гистограммах распределений по размерам шаг задавался половиной расстояния между пикселями, под каждой такой гистограммой указан шаг гистограммы Δ в нанометрах. Значения же на оси ординат гистограмм задают количества МК Δn в каждом столбике.

Если пронумеровать столбики гистограммы индексом i , то Δn_i будет отличаться от $n_{МК,i}$ в формулах (4-9) только тем, что является количеством микрокристаллов i – размера на исследуемых кадрах, и они связаны между собой линейно.

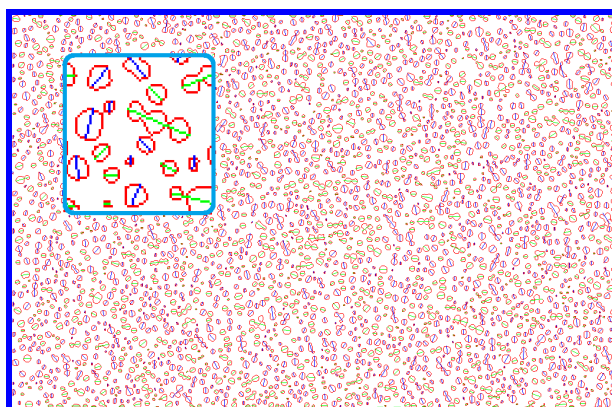


a.

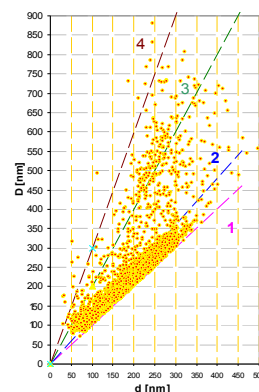


b.

Рис. 10.1 Ядерная фотоэмульсия NIT .

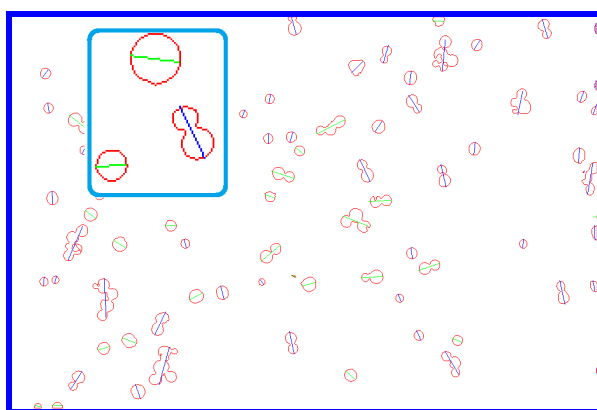


a.

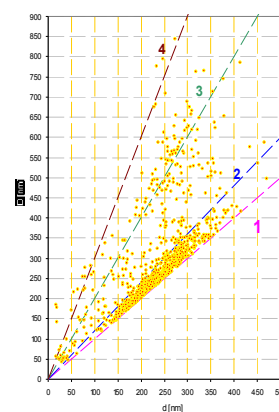


b.

Рис. 10.2 Образец С9 ядерной фотоэмульсии.



a.



b. Использовано 15 снимков

Рис. 10.3 Образец С12 ядерной фотоэмульсии.

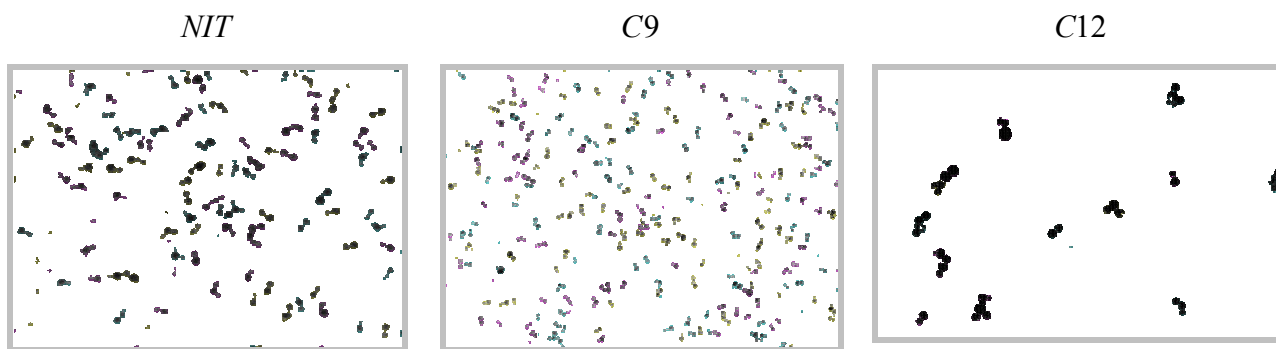


Рис.11. Области почернения с $\delta\tau > 50\%$

На диаграммах Рис.13 для $\eta \leq 1.2$ под номером 1 даны гистограммы, описывающие распределения областей почернения по большим осям вписанных эллипсов $\Delta n(D)$, а под номером 2 распределения $\Delta n(d)$ малым осям. Эти распределения близки друг другу, только распределения $\Delta n(d)$ слегка сдвинуты влево относительно распределений $\Delta n(D)$.

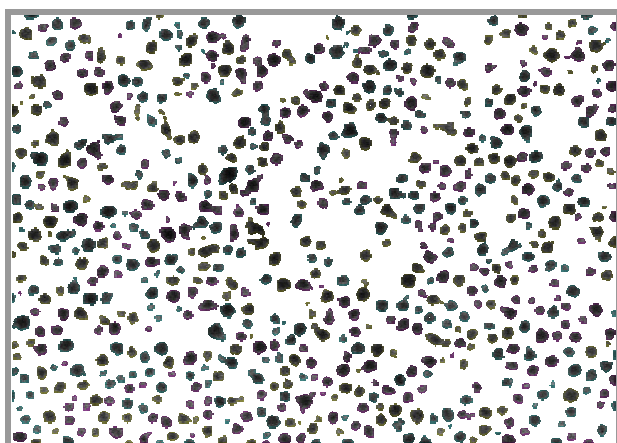
На рис.14 приводятся кадры исследуемых трех эмульсий, на которые перенесены области почернения с большими отношениями $\eta > 1.2$ осей вписанных эллипсов. Большая часть этих областей образована парами неразделенных программой микрокристаллов. Справа от каждого кадра рис. 14 приводятся соответствующие ему гистограммы пары распределений $\Delta n(D)$ и $\Delta n(d)$.

На рисунках 15 приводятся диаграммы с тремя распределениями для каждой исследованной эмульсии, диаграммы (a) относятся к распределениям по величинам больших осей $\Delta n(D)$: 1. $\eta \leq 1.2$; 2. $\eta > 1.2$; 3. $\eta \geq 1$ и диаграммы (b) к распределениям длинам малых осей $\Delta n(d)$: 1. $\eta \leq 1.2$; 2. $\eta > 1.2$; 3. $\eta \geq 1$. Гистограммы рис.15 под номером №3 являются суммой первых двух с $\eta \leq 1.2$ (№1) и $\eta > 1.2$ (№2). На рис.14-1 распределение $\Delta n(D)$ эмульсии *NIT* имеет более длинный хвост по сравнению с $\Delta n(d)$, в то время как для эмульсии *C9* эти распределения близки.

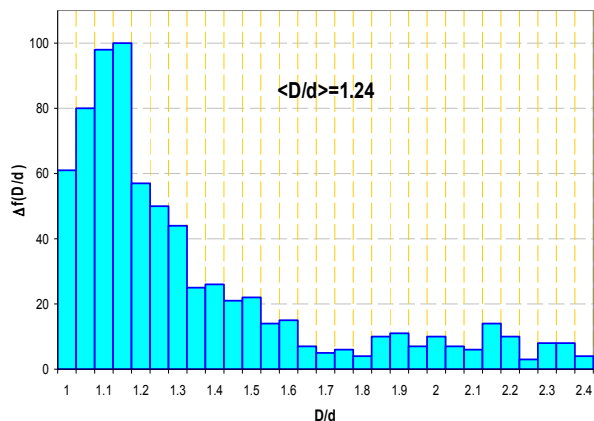
Почти все области почернения эмульсии *C12* с $\eta > 1.2$ состоят из двух и более МК. От количества МК в таких областях зависят только величины больших осей, поэтому распределение по малой оси $\Delta n(d)$ подобно распределениям $\Delta n(D)$ и $\Delta n(d)$ областей $\eta \leq 1.2$ этой же эмульсии.

В таблице 1 для каждой эмульсии приводятся количества найденных и проанализированных областей почернения $n_{МК}$ (колонки 1 и 6), средние значения $\langle D \rangle$ больших осей (колонки 2 и 7) и малых осей $\langle d \rangle$ (колонки 4 и 9), а также их среднеквадратичные дисперсии σ_D (колонки 3 и 8) и σ_d (колонки 5 и 10) для обоих

рассмотренных интервалов отношения осей η . У всех эмульсий дисперсии для $\eta > 1.2$ оказались, как и следовало ожидать, больше, чем для $\eta \leq 1.2$.

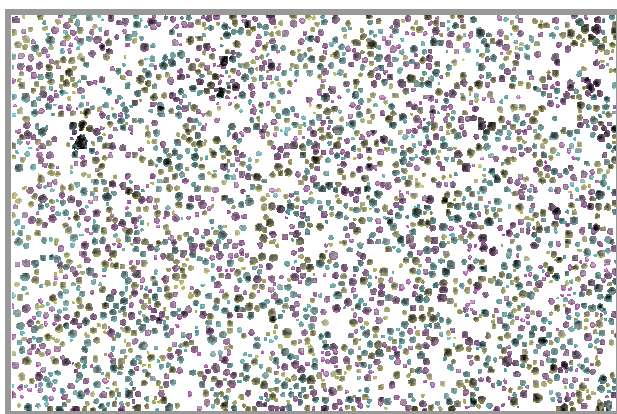


a

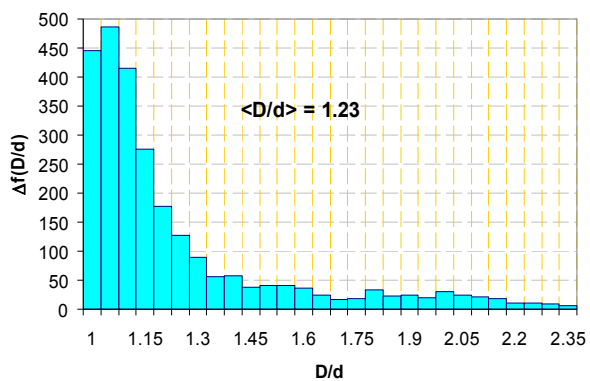


b

Рис. 12-1. Эмульсия *NIT* Области-эллипсы с $\delta r \leq 50\%$.

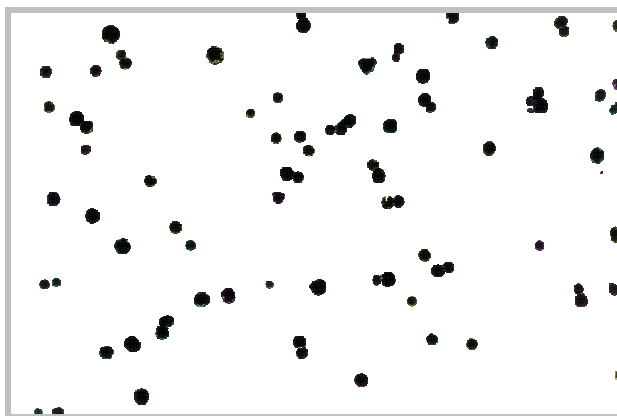


a

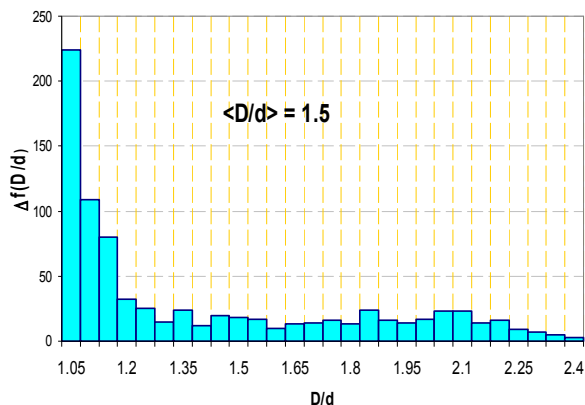


b

Рис. 12-2. Образец эмульсии *C9*. Области-эллипсы с $\delta r \leq 50\%$.



a



b. Обработано 15 кадров *C12*.

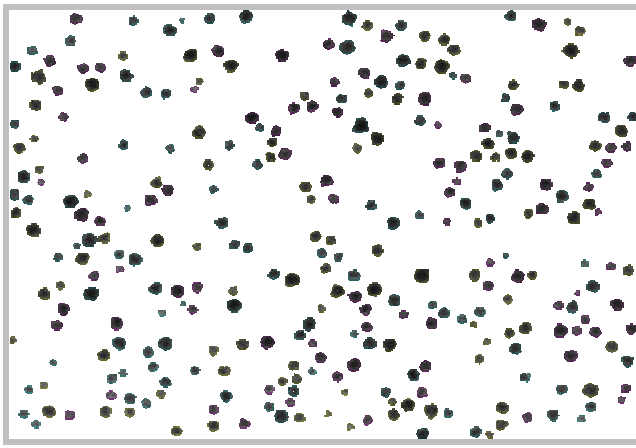
Рис. 12-3. Образец эмульсии *C12*. Области-эллипсы с $\delta r \leq 50\%$.

Измерения диаметров МК эмульсии С12, проведенные в ФИАНе вручную, дали $D = 330 \pm 54 \text{ nm}$. Перерасчет среднеквадратичной дисперсии σ_D к погрешности автоматически проведенных измерений больших диаметров эмульсии С12 даёт $D = 263 \pm 63 \text{ nm}$. Таким образом, автоматические и ручные измерения на противоречат друг другу: существует подинтервал пересечений измеренных разным способом интервалов значений диаметров микрокристаллов эмульсии С12. Ширина этого подинтервала оказалась равной 50 нм, что дает итоговое значение диаметра $D = 301 \pm 25 \text{ nm}$.

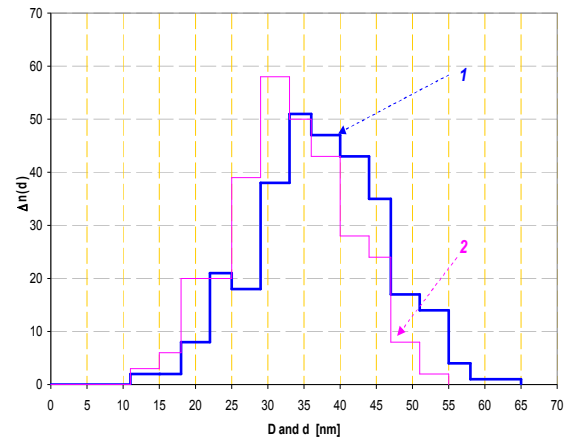
В таблице 2 приводятся суммарные количества найденных областей почернения с $\eta \geq 1$ и $\delta r < 50\%$ (колонка 1), средние значения больших (колонка 2) и малых осей (колонка 4), их среднеквадратичные значения (колонки 3 и 5, соответственно), средние отношения осей $\langle \eta \rangle$ (колонка 6), и среднеквадратичные отклонения контура областей почернения от формы эллипса $\langle \delta r \rangle$ (колонка 7). Следует отметить, что автоматические измерения для эмульсии С12 дали $\langle \eta \rangle = 1.5$, а ручные измерения в ФИАНе дали для этой же эмульсии $\langle \eta \rangle = 1.257$. Разница объясняется тем, что при измерении вручную удаётся чаще различить микрокристаллы, изображения которых частично накладываются друг на друга. Поэтому чаще отыскиваются диаметры каждого микрокристалла, а не суммарные размеры группы микрокристаллов, и среднее значение $\langle \eta \rangle$ при ручном измерении диаметров получается меньше, чем при автоматическом измерении.

Таблица 1.

| | Эллипсы с $\eta \leq 1.2$ | | | | | Эллипсы с $\eta > 1.2$ | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|--------------|------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| | $n_{МК}$ | $\langle D \rangle$ нм | σ_D % | $\langle d \rangle$ нм | σ_d % | $n_{МК}$ | $\langle D \rangle$ нм | σ_D % | $\langle d \rangle$ нм | σ_d % |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| НПТ | 301 | 40.8 | 21 | 36.8 | 22 | 426 | 42.6 | 41 | 29 | 39 |
| С9 | 1702 | 223 | 27 | 203 | 27 | 1029 | 220 | 53 | 153 | 45 |
| С12 | 611 | 263 | 24 | 244 | 23 | 272 | 387 | 47 | 216 | 44 |

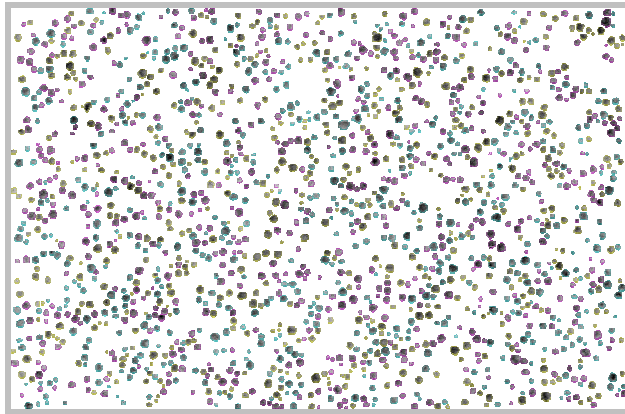


a.

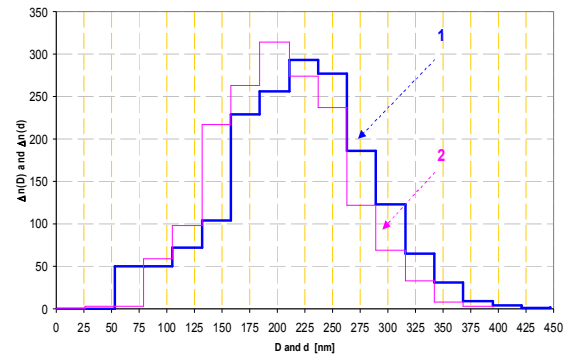


b. $\Delta = 1.82 \text{ nm}$

Рис. 13-1. Области почернения с $\delta r \leq 50\%$ и $\eta \leq 1.2$ фотоэмульсии NIT.

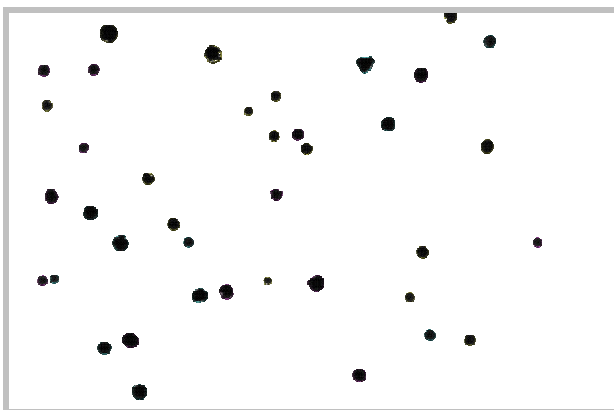


a.

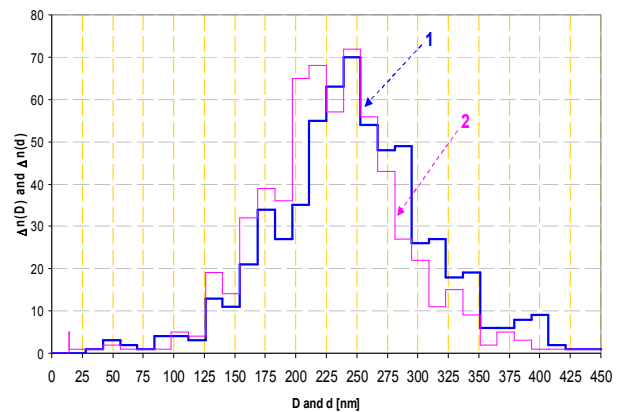


b. $\Delta = 13.2 \text{ nm}$

Рис. 13-2. Области почернения с $\delta r \leq 50\%$ и $\eta \leq 1.2$ образца фотоэмульсии C9.

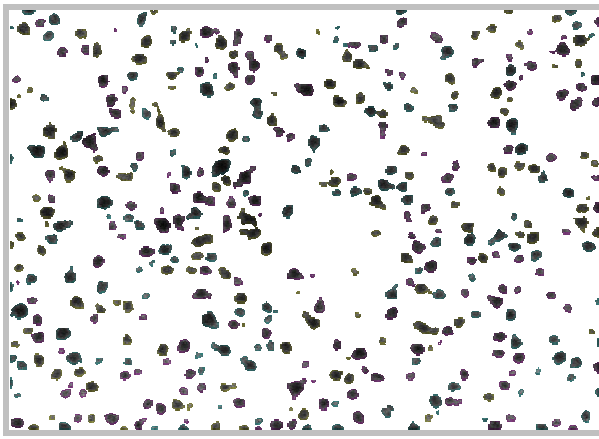


a.

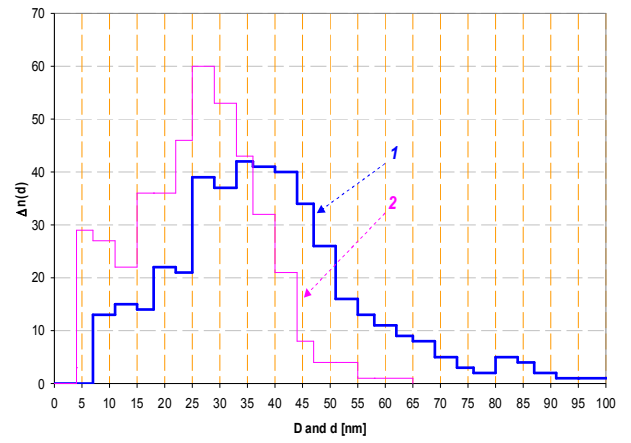


b. Обработка 15 кадров. $\Delta = 7.02 \text{ nm}$

Рис. 13-3. Области почернения с $\delta r \leq 50\%$ и $\eta \leq 1.2$ образца фотоэмульсии C12.

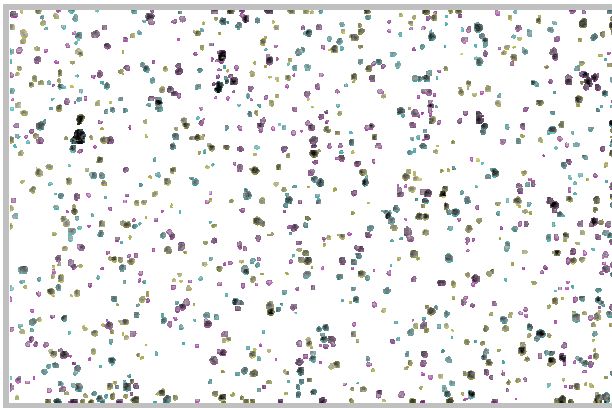


a.

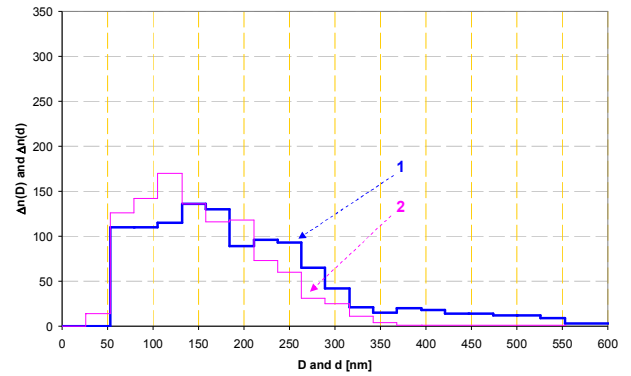


b. $\Delta = 1.82 \text{ nm}$

Рис. 14-1. Кадр эмульсии NIT с областями почернения, для которых $\eta > 1.2$, и распределения $\Delta n(D)$ и $\Delta n(d)$.

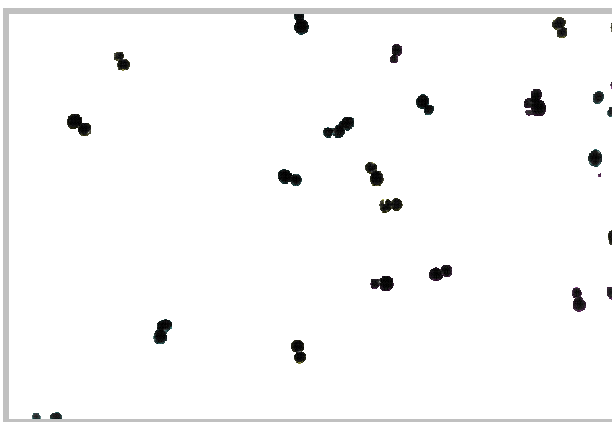


a.

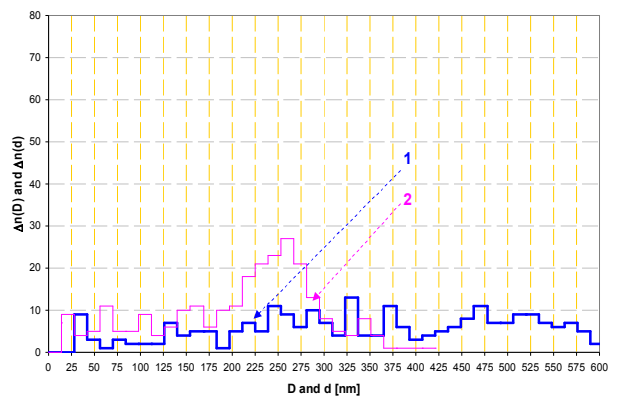


b. $\Delta = 13.2 \text{ nm}$

Рис. 14-2. Кадр образца эмульсии C9 с областями почернения, для которых $\eta > 1.2$, и распределения $\Delta n(D)$ и $\Delta n(d)$



a.



b. Обработка 15 кадров. $\Delta = 7.02 \text{ nm}$

Рис. 14-3. Кадр образца эмульсии C12 с областями почернения, для которых $\eta > 1.2$, и распределения $\Delta n(D)$ и $\Delta n(d)$

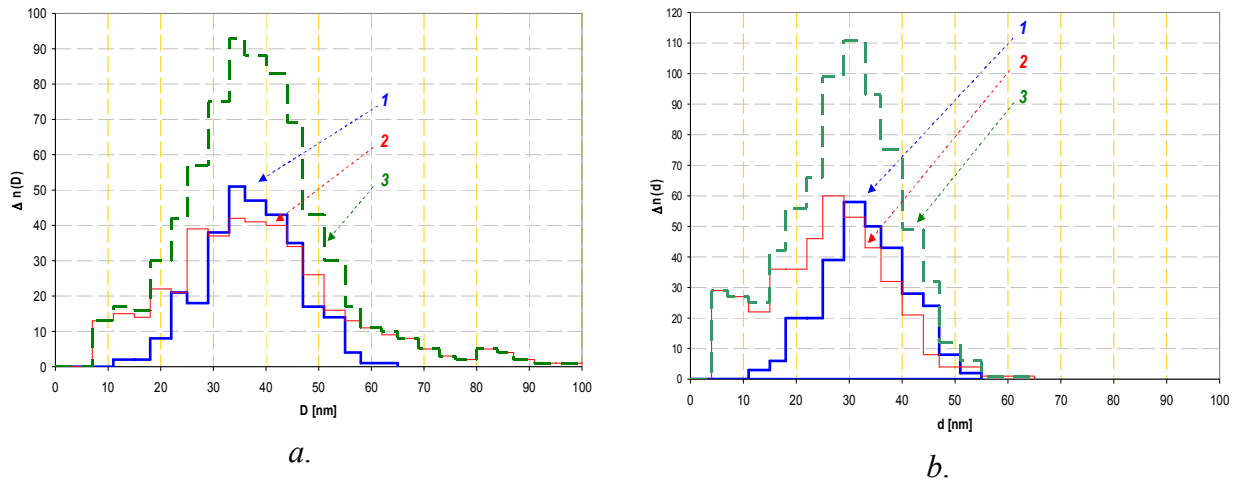


Рис. 15-1. Ядерная фотоэмульсия *NIT*. $\Delta = 1.82 \text{ nm}$. Распределения эллипсов $\Delta n(D)$ -*a* и $\Delta n(d)$ -*b*, вписанных в области почернения, по величинам больших осей для МК: 1. $\eta \leq 1.2$; 2. $\eta > 1.2$; 3. $\eta \geq 1$.

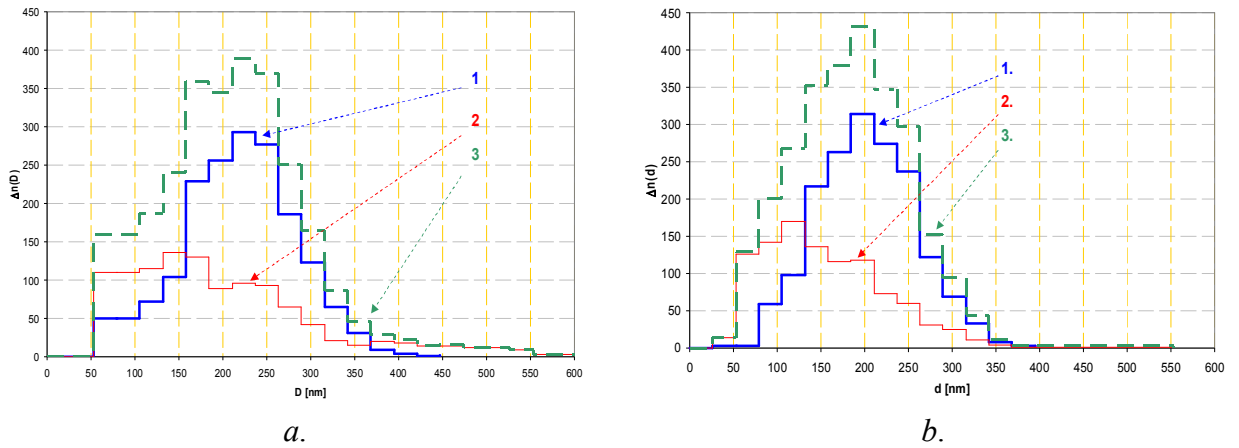


Рис. 15-2. Образец фотоэмульсии *C9*. $\Delta = 13.2 \text{ nm}$. Распределение эллипсов $\Delta n(D)$ -*a* и $\Delta n(d)$ -*b*, вписанных в области почернения, по величинам больших осей для МК: 1. $\eta \leq 1.2$; 2. $\eta > 1.2$; 3. $\eta \geq 1$.

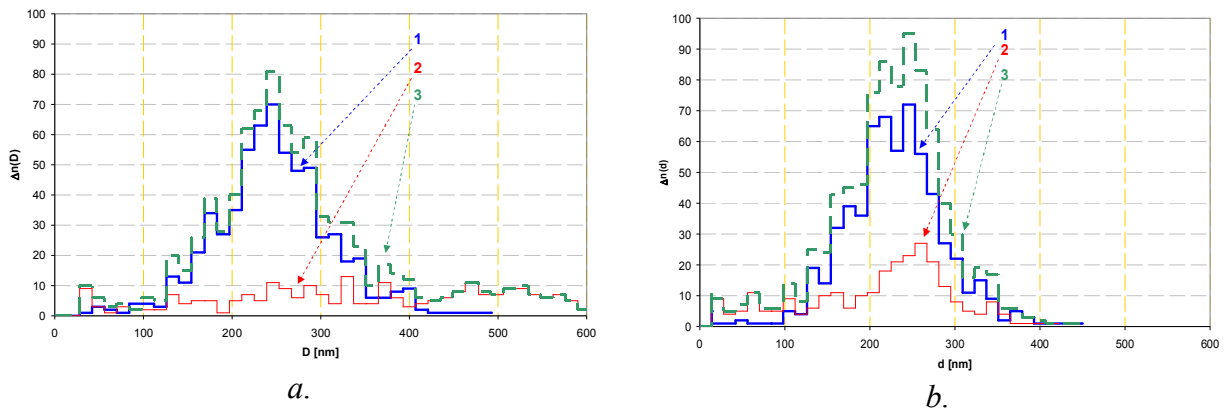


Рис. 15-3. Образец фотоэмульсии *C12*. $\Delta = 7.02 \text{ nm}$. Распределение эллипсов $\Delta n(D)$ -*a* и $\Delta n(d)$ -*b*, вписанных в области почернения, по величинам больших осей для МК: 1. $\eta \leq 1.2$; 2. $\eta > 1.2$; 3. $\eta \geq 1$.

Таблица 2.

| Все эллипсы | | | | | | | |
|-------------|----------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | $n_{МК}$ | $\langle D \rangle$ нм | σ_D % | $\langle d \rangle$ нм | σ_d % | $\langle \eta \rangle$ D/d | $\langle \delta r \rangle$ % |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| НИТ | 727 | 41.8 | 34 | 32.2 | 33 | 1.24 | 26 |
| С9 | 2731 | 222 | 39 | 184 | 36 | 1.23 | 19 |
| С12 | 883 | 301 | 42 | 236 | 30 | 1.50 | 29 |

3. Распределение по размерам микрокристаллов, получивших способность к проявлению после облучения слабо и сильноионизирующими частицами.

Распределение по размерам встреченных частицей микрокристаллов $\Delta n_0(D)$ не совпадает с распределением по размерам микрокристаллов $\Delta n(D)$ в облучаемом слое эмульсии. Это происходит в результате того, что вероятность встречи частицей микрокристалла данного i -го размера пропорциональна суммарной площади поперечного сечения микрокристаллов этого размера:

$$\Delta n_0(D_i) = \frac{D_i^2 \cdot \Delta n(D_i)}{\sum_{k=1}^Q D_k^2 \cdot \Delta n(D_k)}; \quad (21)$$

Это распределение нормировано на единицу и является условной вероятностью того, встреченный МК имеет значение большой оси D_i . Q - количество интервалов значений D_i гистограммы, полное количество МК, учтенное в этом распределении, находится из суммы:

$$N_{МК} = \sum_{i=1}^Q \Delta n(D_i) \quad (22)$$

Зная D_i , распределение $\Delta n(D_i)$ и вероятность проявления зерна $P^+(D_i)$, можно также найти нормированное на единицу распределение по размерам микрокристаллов, получивших способность к проявлению в результате прохождения через них ионизирующей частицы:

$$\Delta n^+(D_i) = \frac{D_i^2 \cdot \Delta n(D_i) \cdot P^+(D_i)}{\sum_{k=1}^Q D_k^2 \cdot \Delta n(D_k) \cdot P^+(D_k)}; \quad (23)$$

Это условная вероятность того, что встреченный частицей и получивший способность к проявлению МК имеет размер D_i .

На рисунке 16 приведены диаграммы для исследуемых трех эмульсий. На каждой диаграмме пять гистограмм:

1 – распределение МК по размерам в сухом слое эмульсии $\Delta n(D)$;

2 – распределение по размерам $\Delta n^+(D)$ микрокристаллов сухого слоя, которые получили способность к проявлению в результате прохождения через них слабоионизирующей частицы с зарядом $Z=1$ в релятивистском минимуме ионизации. При расчете предполагалось, что все эмульсии сенсibilизированы по технологии ядерной фотоэмульсии тип-Р2 и применима формула (17);

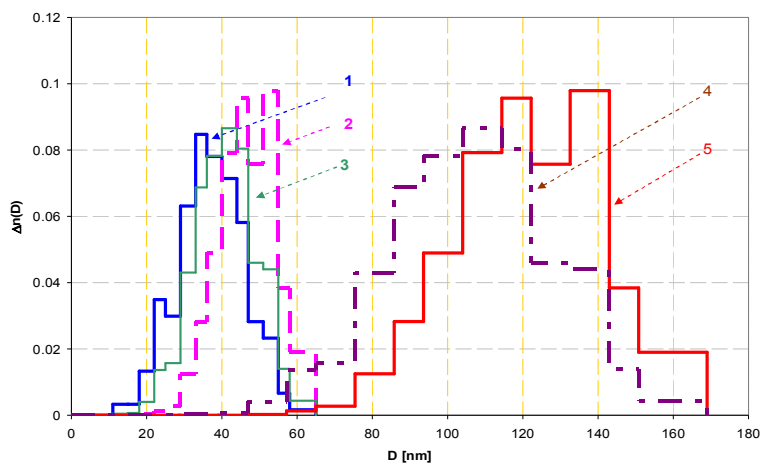
3 – распределение МК по размерам, получивших способность к проявлению в результате прохождения через них сильно ионизирующей частицы с $P^+(D)=1$, в этом частном случае распределение (23) совпадает с распределением (21);

4. Распределение по размерам проявленных зерен в треке сильноионизирующей частицы с $P^+(D)=1$;

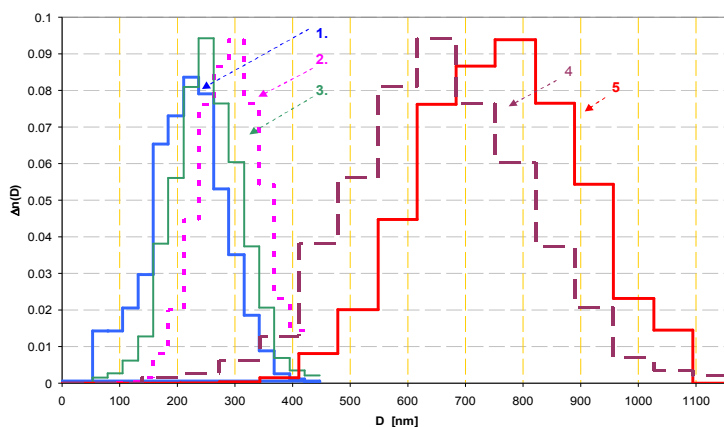
5. Распределение по размерам проявленных зерен для трека однозарядной частицы с ионизацией в релятивистском минимуме.

Из рис. 16 видно, что у всех эмульсий в нормированном на единицу распределении $\Delta n^+(D)$ относительная доля МК с меньшими размерами, в которых образовались центры проявления, уменьшена слева от максимума распределения по отношению к исходному распределению $\Delta n(D)$. Доля же более крупных МК справа от максимума распределения увеличена, максимум смещен в сторону больших размеров МК. Деформация распределения $\Delta n^+(D)$ сильнее при прохождении слабоионизирующей частицы, т.к. квадратичная зависимость от размера в (23) умножается на вероятность $P^+(D)$, которая растет с увеличения размеров МК. В таблице 3 приведены относительные изменения средних размеров МК $100 \cdot \frac{\Delta \langle D \rangle}{\langle D \rangle}$ способных к проявлению по отношению к среднему размеру МК исходной ядерной фотоэмульсии. Средний размер МК эмульсии NIT , способных проявиться после облучения сильноионизирующими частицами, увеличивается на 10%, а средний размер МК после облучения слабоионизирующими частицами в нормированном на единицу распределении $\Delta n^+(D)$ увеличивается на 25%. Для эмульсии $C9$ эти увеличения размеров составляют 15% и 34%, а для $C12$ равны 12% и 24%. Именно зависимость вероятности встречи частицы с МК от его размеров учитывается с помощью коэффициента Баркаса /5/, когда вместо распределений по размерам для расчетов плотности проявленных треков используется средний размер МК. При проявлении эмульсии МК превращаются в зёрна, размеры которых 2.6 раз больше

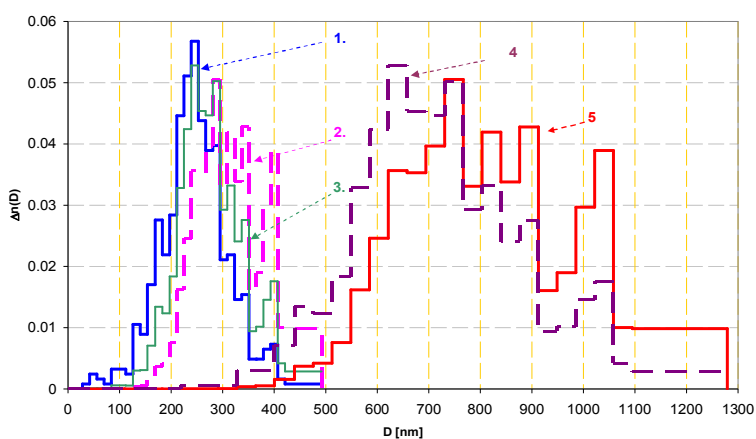
размеров МК. Поэтому распределения проявленных зерен 4 и 5 шире соответствующих им распределений МК и максимумы этих распределений в 2.6 раза смещены вправо.



a. – NIT . $\Delta = 1.82 \text{ nm}$



b. – C9. $\Delta = 13.2 \text{ nm}$



c. – C12. $\Delta = 7.02 \text{ nm}$

Рис. 16. Сравнение исходного распределения МК по размерам (гистограмма №1) с распределениями по размерам МК, получивших способность к проявлению в треке однозарядной частицы с ионизацией в релятивистском минимуме (гистограмма №2) и в треке сильноионизирующей частицы с $P^+(D) = 1$ (гистограмма №3). Гистограмма №4

описывает распределение по размерам проявленных зерен в треке сильноионизирующей частицы с $P^+(D)=1$, а гистограмма №5 описывает распределение по размерам проявленных зерен для однозарядной частицы с ионизацией в релятивистском минимуме.

Таблица 3. Относительные разности средних диаметров распределений по размерам МК $n^+(D)$, получивших способность к проявлению, и исходных распределений $n(D)$.

| $\eta \leq 1.2$ | $100 \cdot \frac{\Delta \langle D \rangle}{\langle D \rangle}$ | |
|----------------------|--|---------------------------|
| Ядерная фотоэмульсия | Сильноионизирующие частицы | Слабоионизирующие частицы |
| <i>NIT</i> | 10% | 25% |
| <i>C9</i> | 15% | 34% |
| <i>C12</i> | 12% | 246% |

Нужно признать, что в распределения проявленных зерен по размерам Рис.16 в треке однозарядной релятивистской частицы не учтено появление блобов, образующихся в результате проявления близко лежащих друг другу МК после превращения их в зерна большего размера /6/, или в результате инфекционного проявления двух МК, когда один из них не содержит центра проявления и не способен проявиться самостоятельно /7/. Более точные распределения по размерам проявленных зерен можно получить, проведя компьютерную обработку треков в проявленной эмульсии.

4. Расчет чувствительности ядерных фотоэмульсий с учетом эллипсоидности микрокристаллов.

Когда размеры и габитус микрокристаллов при изготовлении фотоэмульсии уже сформированы, производится процесс химической сенсibilизации. Сенсibilизация по методике К.С.Богомолова /2/ дает значение характеристических удельных ограниченных потерь $REL_0 = 0.25$ кэВ/мкм для ядерной фотоэмульсии тип-Р2, обладающей максимальной чувствительностью.

Логично предположить, что сросшиеся МК близки по форме к эллипсоиду вращения вокруг большой оси. Поэтому для расчета плотности трека в релятивистском минимуме ионизации однозарядной частицы использовался средний объем эллипсоида вращений, отыскиваемый по формуле:

$$\langle V_{МК} \rangle = \frac{\pi \cdot \sum_{i=1}^q D_i d_i^2}{6 \cdot q} \quad \text{мкм}^3 \quad (24)$$

Для средней площади поперечного сечения эллипсоидных МК можно записать:

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\pi \cdot \sum_{i=1}^q D_i d_i}{4q} \quad \text{мкм}^2 \quad (25)$$

С помощью этих двух формул можно вместо выражения (5) написать формулу для количества МК формы эллипса, встречаемых движущейся через эмульсионный слой частицей на прямолинейном отрезке длиной в 100 мкм :

$$n_0 = 100 \cdot \frac{m_{AgBr}}{\rho \cdot \langle V_{MK} \rangle} \cdot \langle \sigma \rangle \cdot 1/100 \text{ мкм} \quad (26)$$

Здесь m_{AgBr} - масса бромистого серебра $AgBr$ в одном кубическом микроне. На Рис. 17 приведены зависимости $n_0(m_{AgBr})$ встречаемых частицей на ста микронах пути в образцах С9 и С12.

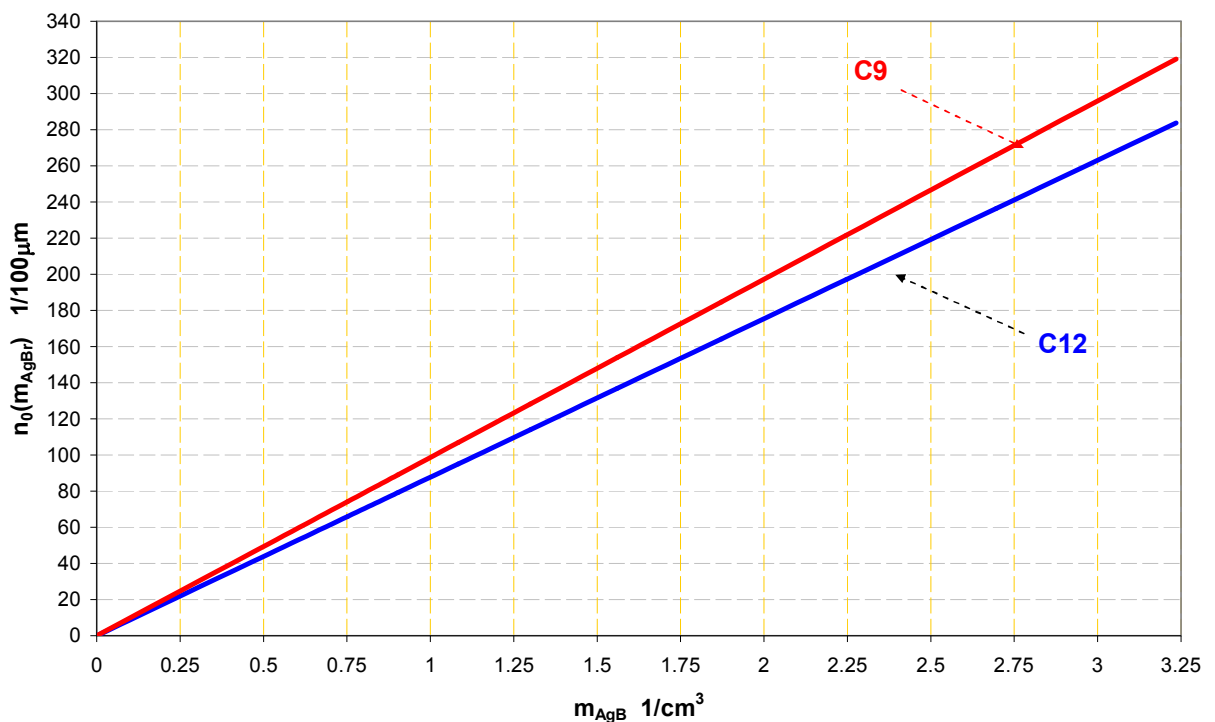


Рис. 17. Зависимость количества микрокристаллов n_0 , встречаемых частицей на ста микронах прямолинейного пробега в образцах эмульсии С9 и С12, от содержания бромистого серебра m_{AgBr} .

Объем $V_{AgBr} = 3/7$ для эмульсии *NIT* дается в работе /4/, а для образцов эмульсии С9 и С12 принимался равным объемной доле бромистого серебра ядерной фотоэмульсии тип-Р2. Расчетные величины $\langle V_{MK} \rangle$ рассмотренных эмульсий даны в Таблице 4.

Таблица 4. Средние объемы МК с $\eta \leq 1.2$.

| Ядерная фотоэмульсия | $\langle \sigma \rangle \text{ нм}^2$ | $\langle V_{МК} \rangle \text{ нм}^3$ | $n_0 \text{ 1/100 мкм}$ |
|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| <i>NIT</i> | 1238.9 | 33096 | 1604 |
| <i>C9</i> | 38135.7 | 5887946 | 319 |
| <i>C12</i> | 55212.6 | 9588687 | 284 |

Если бы все микрокристаллы были ориентированы по направлению движения частицы, то плотность трека можно было бы найти по формуле:

$$n^+(REL_0) = 100 \cdot \frac{V_{AgBr}}{\langle V_{МК} \rangle} \cdot \frac{\pi \sum_{i=1}^Q D_i^2 \cdot \Delta n(D_i) P^+(D_i, REL_0)}{4 \cdot \sum_{i=1}^Q \Delta n(D_i)} \quad \text{1/100 мкм} \quad (27)$$

Если бы все большие оси МК были ориентированы перпендикулярно направлению движения частиц, то плотность трека можно найти по этой же формуле, но вместо больших полуосей D_i , нужно было бы использовать малые d_i . Понятно, что в первом случае плотность трека была бы максимально возможной, а в втором наоборот, минимально возможной, т.к. в втором случае средние пути внутри чувствительной области МК, были бы меньше, чем в первом случае (см. Рис.4. и формулу (16)).

На Рис.18 приведены расчетные чувствительности трех исследованных выше ядерных фотоэмульсий для диапазона характеристических ограниченных потерь энергии REL_0 от 0.25 кэВ/мкм до 1.1 кэВ/мкм. Сплошными кривыми показаны результаты расчетов по формуле (27), а штриховыми линиями проводились по этой же формуле, но с использованием вместо больших осей D_i малых осей d_i . Таким образом, штриховые кривые дают минимальные значения плотностей трека в релятивистском минимуме ионизации однозарядной частицы, а сплошными кривыми изображены максимальные плотности трека. Можно увидеть, область значений плотности трека в эмульсии *NIT* значительно ниже соответствующих областей образцов эмульсий *C9* и *C12*. В тоже время области значений плотности трека *C9* и *C12* лежат близко друг к другу и даже имеют общую пересекающуюся часть.

Для нахождения характеристических величин REL_0 исследованных эмульсий необходимо сначала провести их калибровку в пучке однозарядных частиц с энергией в релятивистском минимуме ионизации, а затем воспользоваться расчетными зависимостями рисунка 18. Зная REL_0 исследованных эмульсий можно рассчитывать любые параметры треков частиц или ядер с любым атомным номером Z во всем доступном диапазоне их скоростей или энергий /8/.

На Рис.19 приведены расчетные зависимости чувствительности образцов ядерной эмульсии C9 и C12 при максимальной сенсбилизации с $REL_0 = 0.25 \text{ keV} / \mu\text{m}$ от содержания бромистого серебра в эмульсии. Сплошные линии относятся к расчетам по большим осям D_i , пунктирные к расчетам по осям d_i .

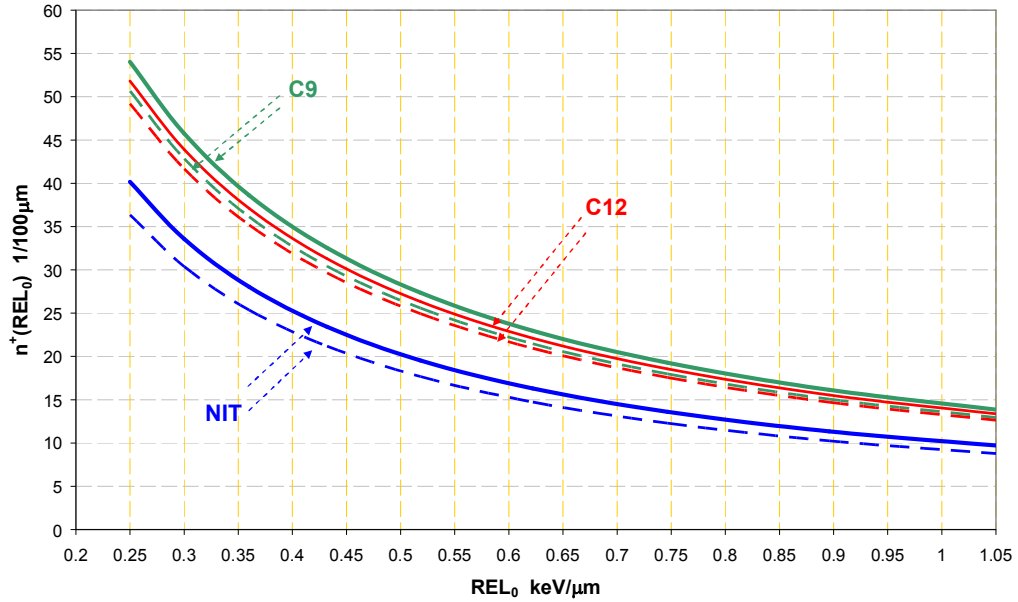


Рис. 18. Расчетная зависимость плотности трека в релятивистском минимуме ионизации однозарядных частиц от характеристических энергетических потерь REL_0 в исследованных эмульсиях. Сплошные кривые рассчитаны с использованием (27), а зависимости, показанные штриховыми линиями, рассчитаны с помощью той же формулы но с заменой D_i на d_i .

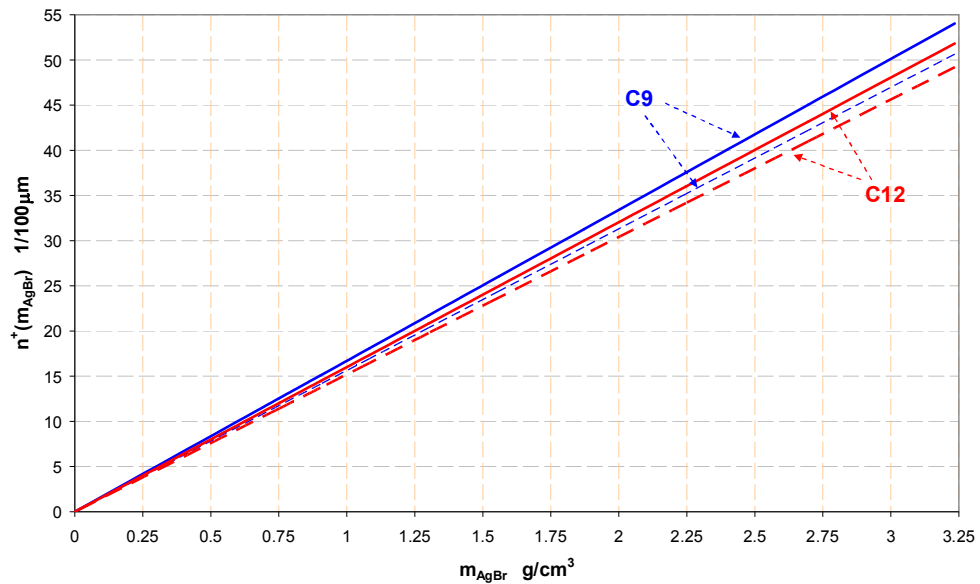


Рис. 19. Зависимость чувствительности образцов эмульсий C9 и C12 в релятивистском минимуме ионизации от количества бромистого серебра в cm^3 при $REL_0 = 0.25 \text{ keV} / \mu\text{m}$.

Заключение.

В работе проанализированы три основных фактора, которые формируют чувствительность ядерных фотоэмульсий, – содержание бромистого серебра, размеры микрокристаллов и создаваемая в результате сенсбилизации характеристическая величина ограниченных потерь REL_0 . Разработан метод и программы для компьютерного анализа фотографий микрокристаллов, отснятых с образцов, не проявленных фотоэмульсий. Продемонстрирована возможность автоматическая аппроксимация эллипсами изображений несферических микрокристаллов. Найдены распределения по большим и малым осям вписанных в изображения микрокристаллов эллипсов, а также зависимости фотоэмульсий от характеристических ограниченных потерь REL_0 и от содержания в эмульсии бромистого серебра.

Литература.

1. Родичева М.Ф. Элементарный состав ядерных фотоэмульсий. – Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинемат., письмо в ред., 1958, т.3, вып. 4, стр. 286-287.
2. Богомолов К.С. Фотографическое воздействие ионизирующих частиц. – Дис. ...докт. физ.-мат. наук. – М., 1959, - 278 стр.
3. Дитлов В. «Проблемы компьютерного анализа оптических изображений, снимаемых из ядерных фотографических эмульсий с помощью автоматизированной системы микрофотометрирования» Рабочее совещание по использованию фотоэмульсий в релятивистской ядерной физике 22-24 апреля 1998 г., Дубна.
4. Taku Nakamura et al., Nucl.Instr.Meth 556 1(2006)80.
5. Barkas W.H. Emulsion Statistics, Univ. Calif. Radiation Lab., Note, UCRL – 8687 (1959).
6. Ditlov V.A., Dubinina V.V., Krotkova V.I., Pozharova E.A., Smirnitsky V.A. Semi-automatic measurement of gap-blob sizes along tracks of relativistic ions for computer identification. In: 21st International Conference on Nuclear Tracks in Solids. New Delhi, India, October 21-25, 2002. Rad. Meas., v36, n1-6, pp.169-174.
7. Пауэлл С., Фаулер П., Перкинс Д. Исследование элементарных частиц фотографическим методом. – М.: ИЛ., 1962. – 424 стр.
8. Ditlov V.A. “ The evolution of track theory throughout the history of the international solid state detector conferences”. Radiation Measurements 34(2001) 19-26.