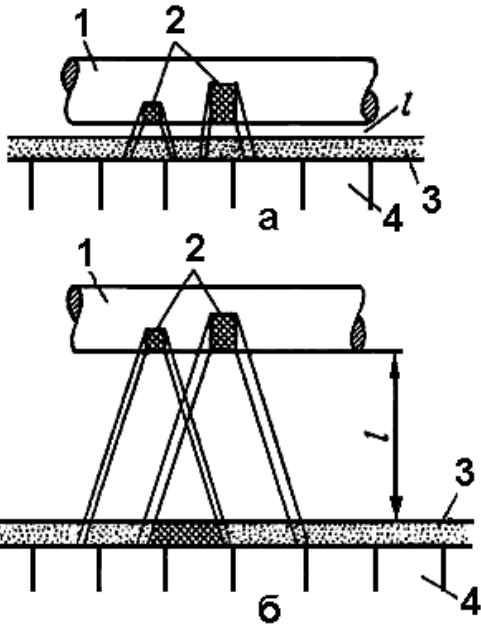


## 2.5 Разрешающая способность метода

Возможности автордиографии, как и любого метода локального анализа, определяются, помимо чувствительности, качеством автордиографического воспроизведения – степенью соответствия между распределением плотности изображения и распределением изотопа в объекте. При этом важно знать качественный характер влияния параметров автордиографического эксперимента на воспроизведение и простейшие количественные критерии качества автордиографического воспроизведения.

Так как качество воспроизведения тем хуже, чем больше расстояние между проявленными кристаллами и источником, то воспроизведение ухудшается с увеличением максимальной и наиболее вероятной энергии  $\beta$ -спектра, толщины промежуточного слоя или воздушного зазора между поверхностью образца и эмульсией, толщины эмульсионного слоя, толщины образца, величины экспозиции, фона (вуали) эмульсии, а также размеров исходного и проявленного кристалла. Уменьшение каждого из этих параметров улучшает воспроизведение, но величина эффекта зависит от значения остальных параметров.

Наиболее простым критерием качества воспроизведения является разрешающая способность – минимальное расстояние между двумя источниками ядерного излучения простейшей геометрии в неактивной матрице, при котором эти источники ещё раздельно изображаются на автордиограмме. Чем выше разрешающая способность, тем точнее соответствие между автордиографическим изображением и структурой образца. Разрешающая способность показывает, насколько точно можно определить местонахождение источников ионизирующего излучения в образце.



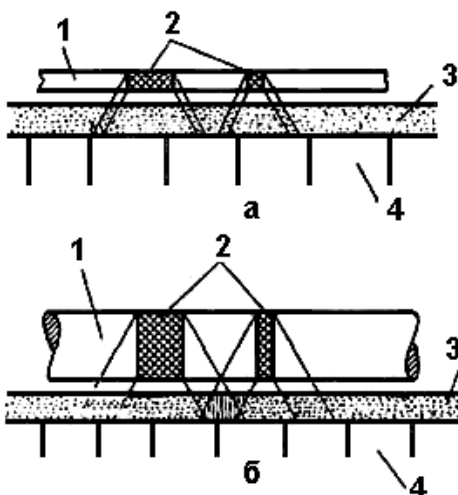
**Рис. 3.** Влияние расстояния между образцом, содержащим радиоактивные включения, и фотослоем на разрешающую способность. а – расстояние меньше толщины образца; б – расстояние больше толщины образца; локализовать включения нельзя. 1 – образец, 2 – радиоактивные включения, 3 – фотослой, 4 – подложка фотоэмульсии, 4 – расстояние между образцом и фотоэмульсией.

Источник испускает ионизирующее излучение во всех направлениях. Поэтому изображение данного источника всегда в какой-то степени размыто. Нижний предел разрешающей способности определяется максимальным пробегом испускаемых частиц, тогда как верхний её предел задаётся размером зёрен.

На величину разрешающей способности влияют многие факторы, например, толщина образца, толщина фотографического слоя, расстояние между образцом и фотослоем при их контакте, характер и качество исследуемой поверхности образца, энергия ионизирующего излучения и др. Несмотря на обилие действующих факторов, как правило, удаётся получить высокую разрешающую способность; это связано с тем, что вклад каждого фактора различен. Например, изменение расстояния между образцом и фотослоем оказывает значительно большее влияние на разрешающую способность, чем различная толщина используемых фотографических материалов. Поэтому, если созданы условия, при которых влияние главных факторов сведено к минимуму, то автордиограммы будут обладать высокой разрешающей способностью.

Наивысшая разрешающая способность, достигнутая в настоящее время, составляет 0,1 мкм (при электронно-микроскопическом анализе автордиограммы).

Рассмотрим основные факторы, влияющие на разрешающую способность.



**Расстояние между образцом и фотослоем.** Расстояние между образцом, содержащим радиоактивные включения, и фотографической эмульсией оказывает наибольшее влияние на разрешающую способность метода автордиографии (Рис. ). Очевидно, максимальное разрешение достигается при идеальном контакте образца и фотослоя. Увеличение расстояния между образцом и фотослоем, кроме того, вызывает значительное увеличение времени экспозиции для создания необходимой оптической плотности фотоэмульсии.

**Рис. 4.** Влияние толщины образца на разрешающую способность: а – тонкий образец с радиоактивными включениями; размытые области невелики; включения можно выявить; б – толстый образец с радиоактивными включениями; размытые области увеличились и соединились; выявление

включений затруднено; 1 – образец, 2 – радиоактивные включения, 3 – фотослой, 4 – подложка фотоэмульсии.

Улучшение качества контакта следует начинать с улучшения исследуемой поверхности образца. Хорошие результаты дает приготовление фотослоя непосредственно на поверхности образца. Существуют методики нанесения жидкой фотоэмульсии на поверхность металлических сплавов, геологических и гистологических образцов, позволяющие одновременно просматривать автордиограмму и образец.

**Толщина образца.** Существенное влияние на разрешающую способность оказывает толщина образца. На **Рис.** видно, что чем толще образец, тем меньше разрешающая способность, так как в этом случае на фотослой воздействует излучение не только радиоактивных атомов, находящихся в поверхностном слое, но и тех, которые расположены в глубинных слоях образца (на рисунке это схематично изображено в виде линий, расходящихся под одинаковым углом, но из различных точек радиоактивного включения). На АРГ такого протяжённого источника образуются своеобразные «полутона». Изображение становится менее резким, разрешающая способность ухудшается.

Выбор оптимальной толщины образца тесно связан с учётом плотности материала и энергии излучения введённого радиоактивного изотопа. Например, если образец готовят из алюминия, в который был введён изотоп  $^{45}\text{Ca}$ , то для повышения разрешающей способности необходимо приготовить образец тоньше 0,3 мм. В тех же самых условиях для образца на основе меди потребуется толщина менее 0,1 мм.

Тонкие образцы имеют весьма малую радиоактивность вследствие чрезвычайно низкого содержания в них радиоактивных атомов, что вынуждает к длительной экспозиции. Поэтому желательно готовить тонкие образцы с максимальным содержанием в них радиоактивных атомов. Не следует для сокращения экспозиции применять толстые образцы, так как это приведёт к резкому ухудшению разрешающей способности.

**Толщина образца.** Влияние толщины фотографического слоя на разрешающую способность автордиограмм наиболее ярко проявляется при изучении тонкой детализации радиоактивных включений. Чем тоньше эмульсионный слой, тем выше его разрешающая способность, что при прочих равных условиях обуславливает и более высокую разрешающую способность автордиограммы. В толстом фотографическом слое регистрируется значительная часть пробега, например,  $\beta$ -частицы, тогда как в тонком – лишь его начало, но изображение получается более резкое. Промышленные тонкие эмульсии имеют толщину 3 – 5 мкм.

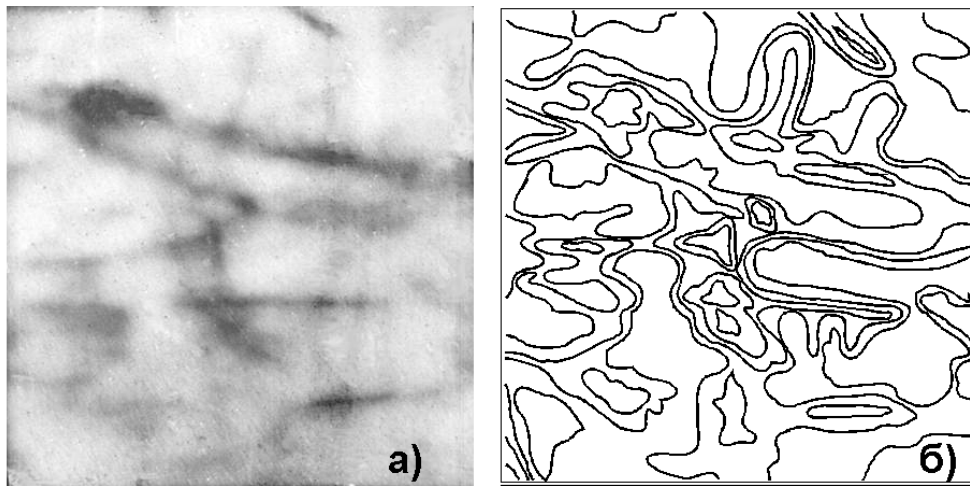
Следует помнить, что с уменьшением толщины фотослоя теряется его чувствительность. Чтобы компенсировать потерю чувствительности, необходимо или удлинить время экспозиции (но не чрезмерно), или повысить концентрацию радиоактивных атомов в образце.

**Величина максимальной энергии  $\beta$ -частиц радиоактивных изотопов.** Фотографический эффект частиц разной энергии неодинаков. Чем меньше энергия частицы, тем больше энергии она теряет на единицу своего пробега в фотоэмульсии, тем, следовательно, больше её фотографический эффект. Поэтому лучшая выявляемость радиоактивных включений будет достигнута в том случае, когда из нескольких возможных радиоактивных изотопов в работе применяют тот,  $\beta$ -частицы которого обладают меньшей максимальной энергией.

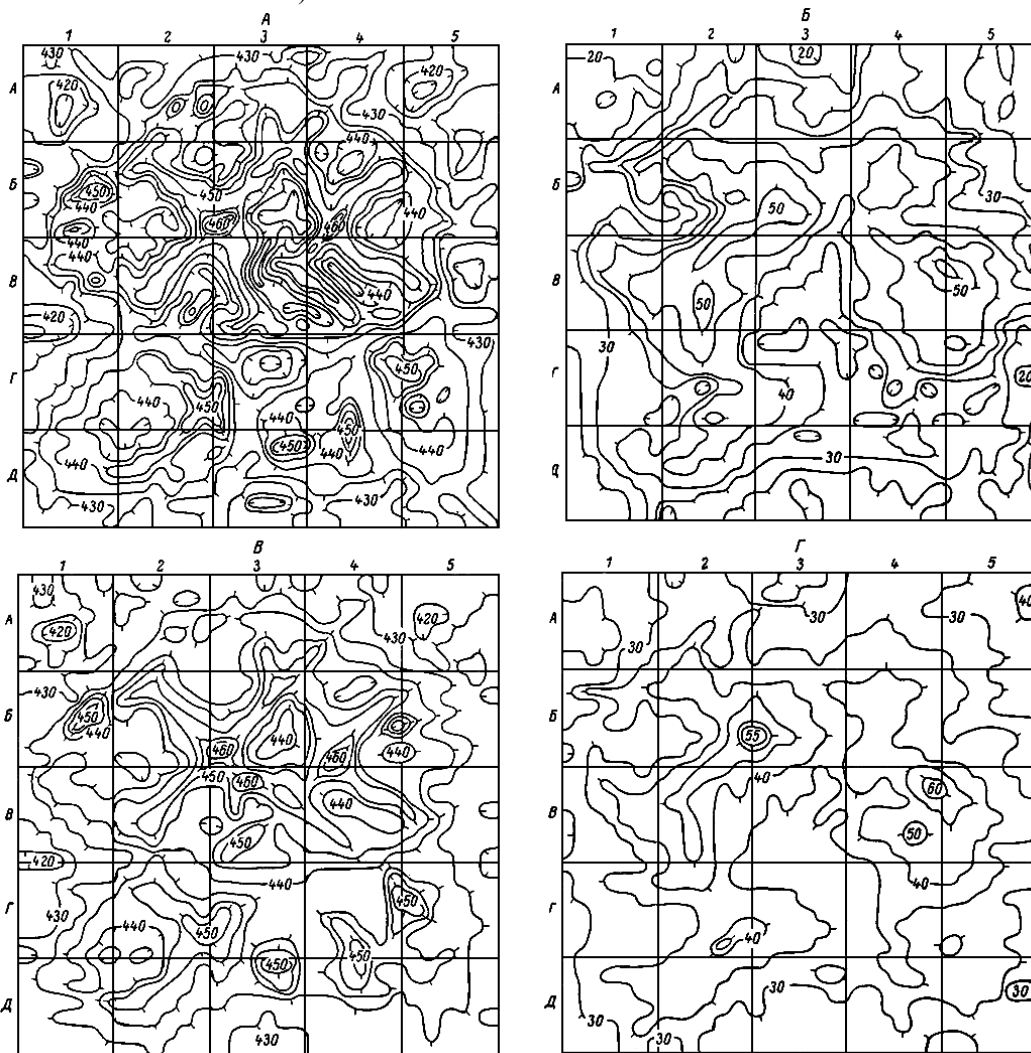
Для  $\gamma$ -квантов характерна такая же зависимость разрешающей способности от их энергии, как и для  $\beta$ -частиц. Разница состоит лишь в том, что фотографическое действие оказывают не столько фотоны, сколько электроны, выбиваемые фотонами при прохождении через фотослой.

Если в качестве радиоактивного индикатора применяют изотоп, испускающий  $\gamma$ -кванты, то в значительной степени снижается разрешающая способность метода.

Таким образом, для достижения наилучшей разрешающей способности макроавтордиографического способа исследования можно рекомендовать следующие условия опыта: 1) образец готовят в виде тонкой пластины, толщина которой взаимосвязана с энергией применяемого радиоактивного изотопа и оптимальном времени экспозиции; 2) если позволяют возможности, то применяют изотоп с малой энергией ядерного излучения; 3) используют фотоматериал, выпускаемый промышленностью специально для регистрации ядерных излучений соответствующего диапазона энергий; 4) осуществляют возможно лучший контакт исследуемой поверхности с фотографической эмульсией.



**Рис. 5.** Авторадиограмма (а) и соответствующая ей карта распределения изолиний одинаковой плотности потемнения фотопластинки. (Распределение паров циклогексана, меченного  $^{14}\text{C}$ , по поверхности фторированной полиэтиленовой пленки).



**Рис. 6.** Изолинии потемнения авторадиограмм (радон в плёнках полипропилена с различной сферолитной структурой).

Типичные значения разрешающей способности составляют: для контактной авторадиографии 10-30 мкм, для съёмного слоя 2,5-20 мкм, для полива монослоя эмульсии (оптический вариант) – порядка 1 мкм, для электронно-микроскопической авторадиографии – 0,1 мкм. С ростом толщины съёмного эмульсионного слоя от 5 до 24 мкм разрешающая способность для  $^{131}\text{I}$  снижается с 2,3 до 12 мкм, а при толщине съёмного слоя 5 мкм с ростом толщины промежуточного слоя от 0 до 10 мкм – с 5,3 до 28 мкм. Для массивного образца, активированного различными изотопами, с ростом  $E_{\text{макс}}$  с 0,018 ( $^3\text{H}$ ) до 1,71 МэВ ( $^{32}\text{P}$ ) разрешающая способность изменяется от 5-10 до 170-300 (контактная авторадиография), от 1 до 2,5-7 (съёмный слой) и от 0,1 до 0,3-3,8 мкм (полив эмульсии на образец).