

УДК 532.785+77.021

Б. А. Сечкарев, Т. А. Ларичев, Е. В. Просвирина, А. Б. Абишева, Е. Н. Харченко

О МЕХАНИЗМЕ РОСТА МИКРОКРИСТАЛЛОВ БРОМИДА СЕРЕБРА В ХОДЕ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ДВУХСТРУЙНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Введение

Метод массовой кристаллизации широко используется в современной химической технологии и позволяет получать широкий ассортимент продуктов с требуемыми характеристиками. Примером подобного использования является производство галогенидосеребряных фотоматериалов [1]. Как известно, регистрирующими элементами фотоплёнки являются микрокристаллы галогенида серебра с размером порядка 0,1 мкм, со сложной структурой и составом [2]. Для непосредственного получения фотоэмульсии (дисперсии галогенида серебра в водно-желатиновом растворе) наиболее часто используют способ контролируемой двухструйной кристаллизации (КДК) [1].

Общеизвестными являются трудности создания работоспособной теоретической модели, позволяющей адекватно описать процесс массовой кристаллизации малорастворимых соединений [3]. Основной проблемой является необходимость учета взаимодействия огромного числа одновременно формирующихся и растущих кристаллов между собой. В научной фотографии для описания процесса КДК обычно используется модель Берри, предложенная им еще в 1976 г. [4]. Данная модель позволила дать системное и непротиворечивое объяснение экспериментально наблюдаемым закономерностям массовой кристаллизации галогенидов серебра. В частности, Берри удалось объяснить, почему, несмотря на чрезвычайно низкую растворимость галогенидов серебра, введение реагентов на поздних стадиях синтеза не приводит к новообразованию частиц AgHal в системе. В соответствии с моделью, формирование твердой фазы происходит на протяжении всего периода введения реагентов. Однако новообразующиеся в области впрыскивания реагентов ультрадисперсные частицы – эмбрионы – попадают затем в объем реакционной смеси, где они служат материалом для роста более крупных кристаллов по механизму Оствальдовского созревания. Таким образом, при проведении контролируемой двухструйной кристаллизации в реакторе существуют, по меньшей мере, две зоны с разными свойствами (рис. 1). В одной из них происходит гомогенное зародышеобразование галогенида серебра, а во второй протекают преимущественно рекристаллизационные процессы.

Для придания своей модели количественного характера Берри использовал положения теории Оствальдовского созревания, разработанной Лифшицем и Слезовым, и, независимо от них, Вагнером (ЛСВ-теории) [5]. Как следствие, в модели Берри для двухструйной кристаллизации AgBr поведение конкретного кристалла (т. е. рост или растворение) не зависит от его положения в реакторе и определяется исключительно взаимосвязью между собственной растворимостью данного кристалла и средней

растворимостью бромида серебра в системе. Из этого вытекают представления о том, что малоразмерные эмбрионы создают вокруг крупных кристаллов некую изотропную по свойствам "атмосферу", которая обеспечивает непрерывное поступление материала для роста этих кристаллов. В то же время сами по себе малоразмерные эмбрионы не играют никакой самостоятельной роли в массовой кристаллизации.

Подход, предложенный Берри, был развит в работах Вэйя и Стронга [6]. Эти авторы исследовали закономерности и кинетику роста изометрических кристаллов AgBr в ходе контролируемой двухструйной кристаллизации. Вэй и Стронг предложили в качестве критериальной рассматривать скорость роста кристаллов, которая не может быть превышена за счет увеличения скорости введения реагентов без опасности вызвать новообразование частиц бромида серебра в системе.

Исходя из предположения о том, что новообразование частиц в системе имеет место только при одном и том же уровне пересыщения, Вэй и Стронг смогли вывести уравнение, связывающее линейный размер кристалла и критическую скорость его роста. Однако практически сразу стали заметны и недостатки данного теоретического подхода. В частности, оставаясь в рамках модели Вэйя и Стронга, невозможно объяснить различие в критической скорости роста одинаковых по размеру кристаллов в разных условиях синтеза [7].

Полная аналогия с теоретической моделью Берри имеет место при выращивании микрокристаллов AgHal способом физического созревания (ФС), когда в системе имеется бимодальная смесь практически монодисперсных кристаллов с большим различием по размеру. Изучение процессов роста кристаллов в данном случае облегчается еще и тем обстоятельством, что процессы массопереноса происходят в закрытой системе и лучше поддаются контролю. Однако исследовавшие подобные системы Богг с соавторами [8], а также Вэй и Шад [9], при создании теоретической модели процессов вновь исходили из того, что меньшие по размеру кристаллы могут только растворяться в ходе созревания. Поэтому их теоретическое описание рекристаллизации практически полностью совпало с моделью Вэйя и Стронга.

Таким образом, до настоящего времени теория роста микрокристаллов в ходе контролируемой двухструйной кристаллизации не претерпела принципиальных изменений. Модель Вэйя и Стронга принималась за основу при интерпретации экспериментальных фактов в большинстве работ, посвященных исследованию процессов массовой кристаллизации [10].

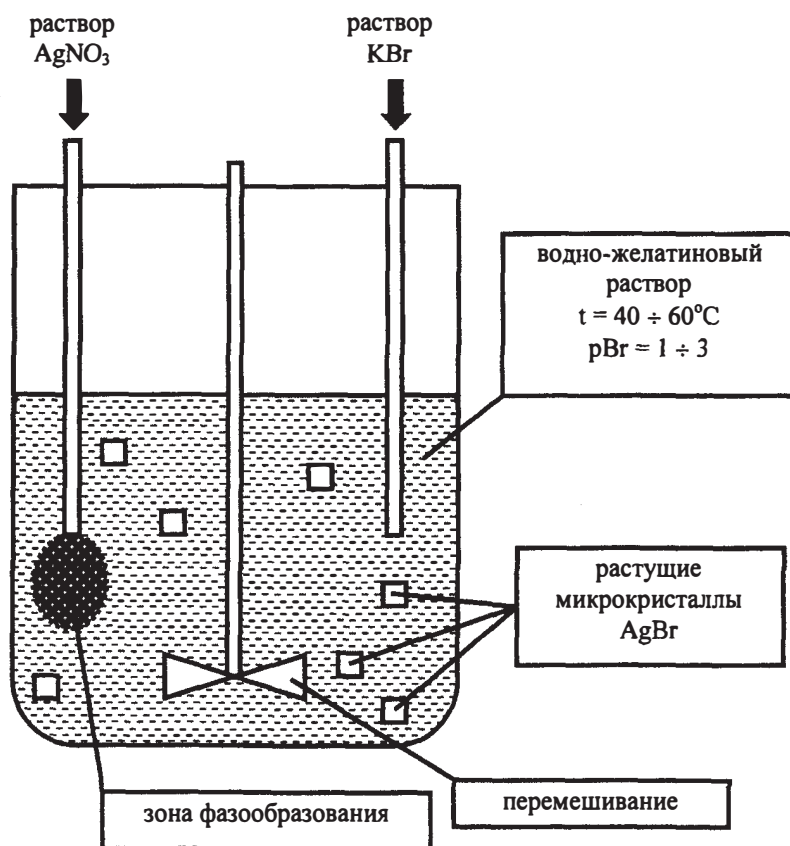


Рис. 1. Принципиальная схема процесса контролируемой двухструйной кристаллизации

Можно было бы ожидать, что существующая модель будет достаточно универсальной и пригодной для описания любых процессов рекристаллизации бимодальных дисперсий галогенидов серебра. Между тем имеются экспериментальные факты, которые не находят адекватного объяснения в рамках существующей теории. К таким фактам относятся, например, зависимость морфологии микрокристаллов, полученных в результате рекристаллизации в гелевой фазе, от концентрации исходных микрочастиц в системе [11], увеличение критической скорости роста кристаллов в "переполненной" системе [12] и т. д. В сложившейся ситуации логичным было бы попытаться разобраться в причинах расхождения теоретических представлений с экспериментальными данными, а также создать более универсальную модель, позволяющую объяснить всю совокупность накопленных экспериментальных результатов и обладающую большей прогностической способностью.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Необходимые данные для разработки новой модели были получены при исследовании кинетики рекристаллизации бимодальных дисперсий бромида серебра в среде желатинового геля (т. е. в условиях неподвижности взаимодействующих частиц) [13]. При интерпретации полученных экспериментальных результатов были использованы предельно общие теоретические положения.

Как известно, в качестве движущей силы процесса рекристаллизации обычно выступает различие в растворимости микрочастиц. В случае сфероидального приближения растворимость (поверхностная концентрация растворенного вещества) связана с радиусом частицы в соответствии с уравнением Гиббса-Томсона (Фрейндлиха-Оствальда) [14]:

$$S_r = S_\infty \exp \left(\frac{2\sigma V_m}{rRT} \right), \quad (1)$$

где S_∞ - растворимость макрофазы, V_m - молярный объем вещества дисперсной фазы, σ - удельная поверхностная энергия.

Поэтому, если в системе присутствуют частицы разного размера, можно ожидать возникновения градиента концентрации и массопереноса от малых частиц к крупным посредством диффузии через раствор в соответствии с первым законом Фика (см. схему на рис. 2).

$$J = -D \frac{\Delta S}{\Delta x}, \quad (2)$$

где D - коэффициент диффузии, $\Delta S/\Delta x$ - соответствует градиенту концентрации растворенного вещества.

Однако рекристаллизация в гелевой среде имеет ряд принципиальных особенностей. Прежде всего, все микрокристаллы неподвижны и находятся на фиксированном расстоянии друг от друга. В обычных условиях, при равенстве масс бромида серебра в обеих размерных фракциях, концентрация малых частиц намного превышает концентрацию

крупных. Поэтому, в условиях равномерного распределения частиц бромида серебра, в геле велика вероятность того, что соседями крупного микрокристалла окажутся только малые частицы (см. схему на рис. 3). В то же время ближайшими соседями малой частицы могут оказаться как крупный кристалл (для частиц типа F1), так и только малоразмерные частицы (F2).

Для неподвижных объектов наиболее интенсивно массообмен может протекать только между соседствующими частицами. Однако, в случае соседства малоразмерных частиц, массоперенос дол-

жен быть малоинтенсивен ввиду слабого различия в растворимости и, как следствие, малой величины градиента концентрации растворенного вещества в пространстве между частицами. Можно ожидать возникновения достаточно интенсивного диффузионного потока растворенного вещества к поверхности крупного микрокристалла от ближайших соседних малоразмерных частиц (F1). В то же время перенос материала к крупному кристаллу от более удаленных частиц (F2) будет заблокирован из-за экранирующего эффекта ближайших частиц (F1).

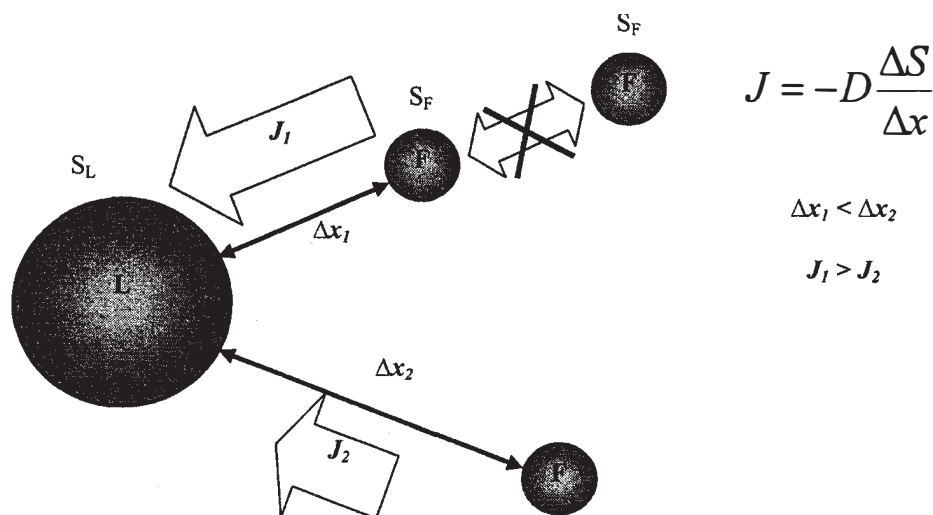


Рис. 2. Схема массообменного взаимодействия между крупной (L) и малыми (F) частицами в ходе рекристаллизации

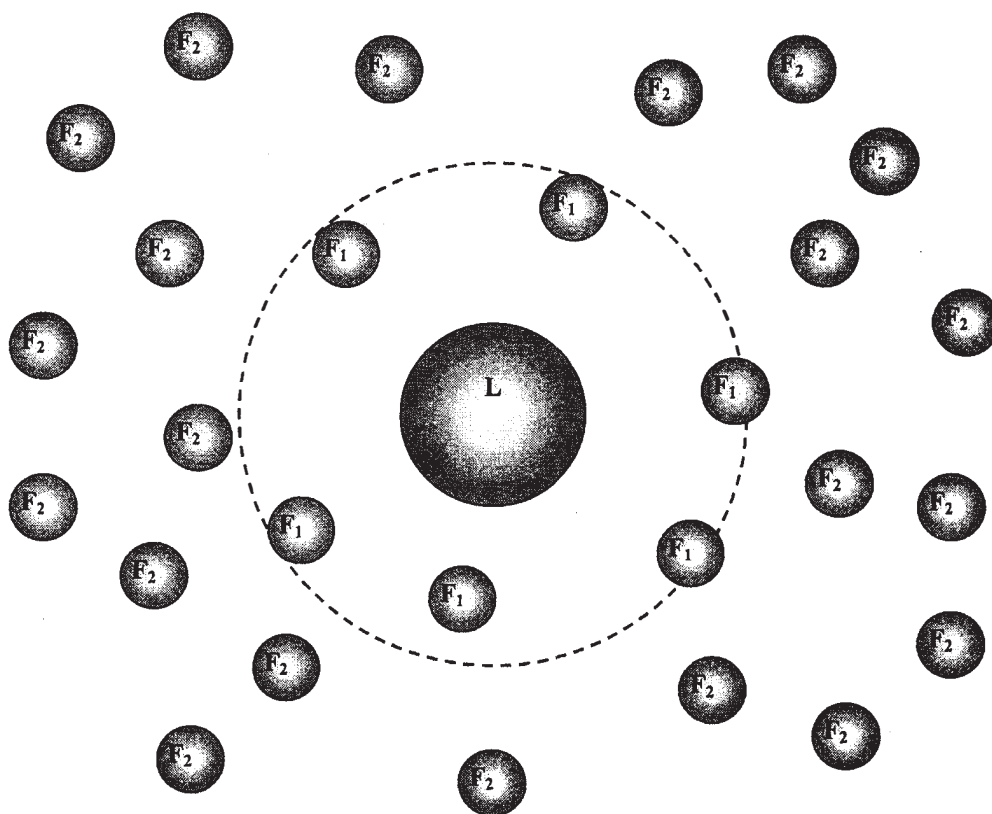


Рис. 3. Взаимодействие центра роста (крупного кристалла) с малоразмерными частицами в ходе рекристаллизации бимодальной дисперсии в геле

Следовательно, в данной системе рост крупных кристаллов должен сопровождаться растворением малоразмерных частиц, однако время жизни конкретной малоразмерной частицы будет определяться ее положением относительно крупной. Растворение малоразмерных частиц будет происходить послойно, причем область интенсивного массопереноса (в которой существует градиент концентрации растворенного вещества) будет простирается от поверхности крупного кристалла до ближайшего слоя малоразмерных частиц.

Полученные экспериментальные данные в целом подтвердили предложенную схему массообмена. Однако было обнаружено, что кинетика рекристаллизации находится в сильной зависимости от концентрации исходных кристаллов в системе (т. е. от среднего межчастичного расстояния) [12]. Более того, в случае рекристаллизации в геле мономодальной дисперсии бромида серебра межчастичное расстояние оказывает влияние даже на морфологию итоговых частиц [10], хотя при физическом созревании той же дисперсии в растворе подобной зависимости не выявляется (рис. 4).

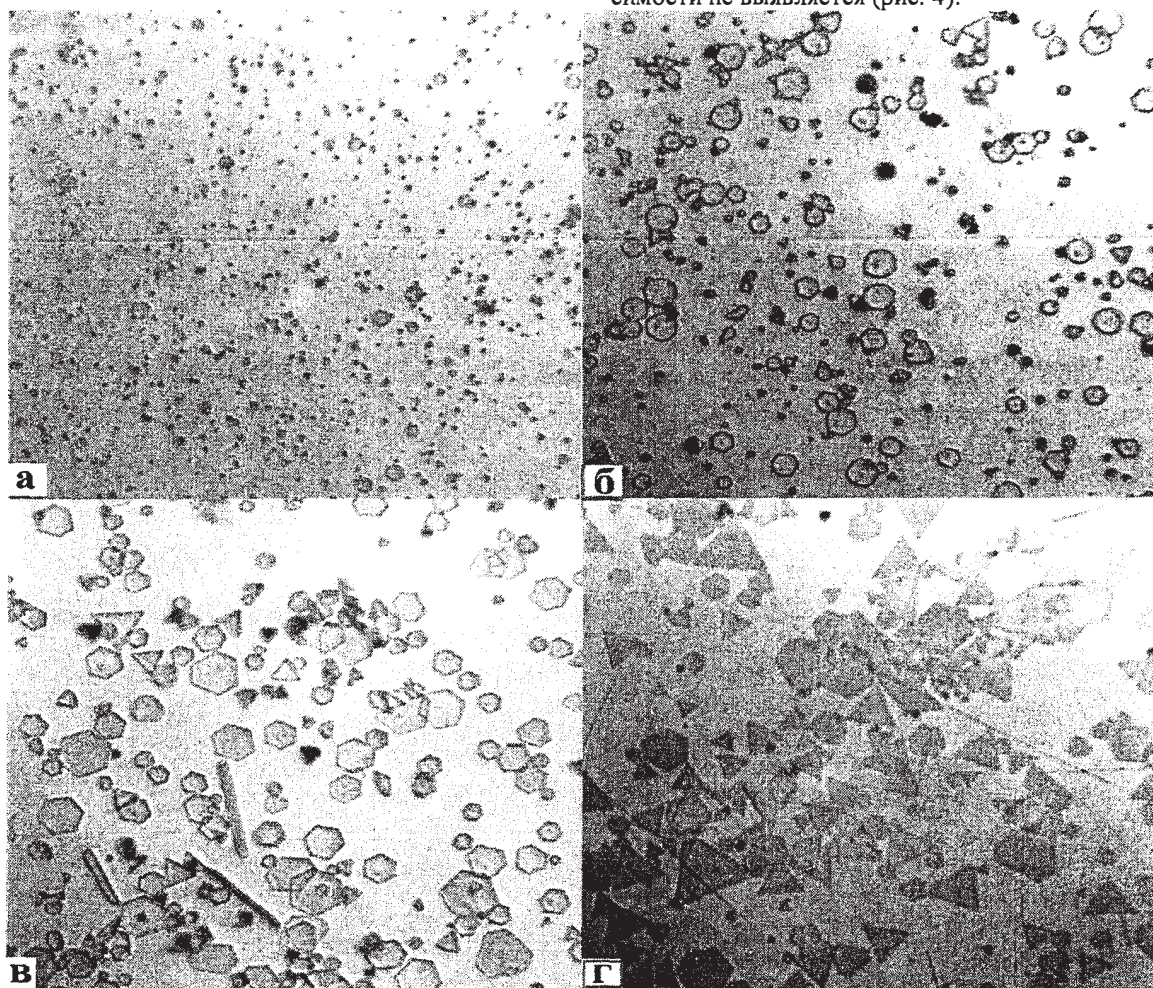


Рис. 4. Микрофотография ($\times 1000$) кристаллов, полученных в результате рекристаллизации в геле ($pBr = 1$, концентрация желатины – 4 % вес.) и при физическом созревании (фото г) одной и той же малоразмерной дисперсии $AgBr$ (средний диаметр микрокристаллов – 60 нм). Исходная концентрация частиц в геле и продолжительность рекристаллизации: а – $1,11 \times 10^{16} \text{ л}^{-1}$ и 14 суток; б – $4,44 \times 10^{16} \text{ л}^{-1}$ и 14 суток; в – $2,22 \times 10^{17} \text{ л}^{-1}$ и 7 суток.

Как известно, в мономодальной дисперсии бромида серебра, полученной способом контролируемой двухструйной кристаллизации, присутствуют частицы двух типов: обычные изометрические микрокристаллы и агрегатные по природе зародыши плоских микрокристаллов, способные к быстрому анизотропному росту [15]. Потенциально в данной системе центрами роста могут быть и относительно крупные изометрические кристаллы исходной дис-

персии, наличие которых обусловлено существованием ненулевого по ширине распределения по размеру. Схема массообменного взаимодействия этих двух центров между собой и с обычными малоразмерными кристаллами представлена на рис. 5. Однако, в условиях постоянного перемешивания, в растворе рост изометрических кристаллов протекает слишком медленно, и они проигрывают в конкуренции за материал зародышам ПМК.

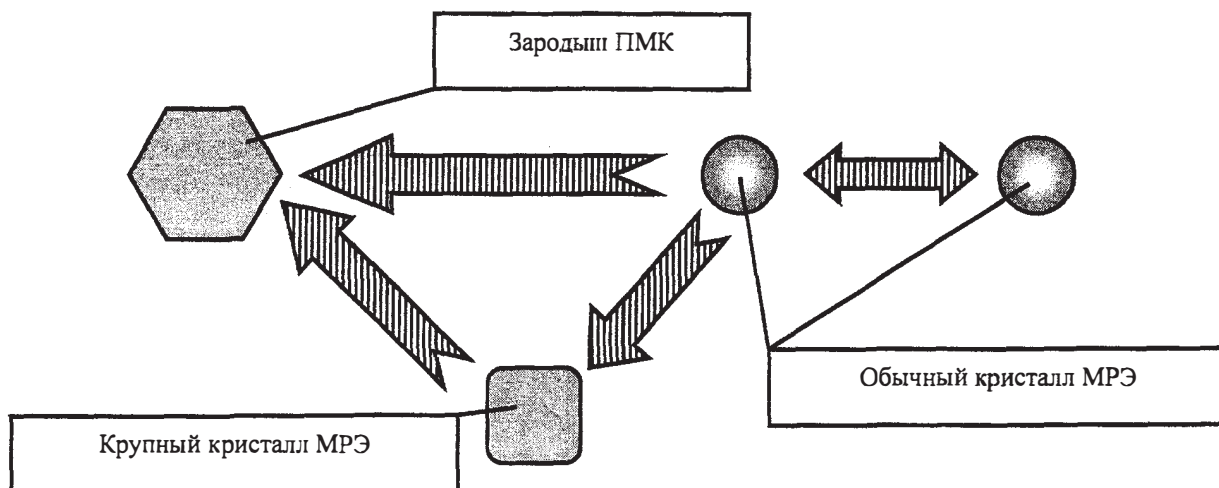


Рис. 5. Направление массопереноса при взаимодействии центров роста и малоразмерных частиц в ходе рекристаллизации

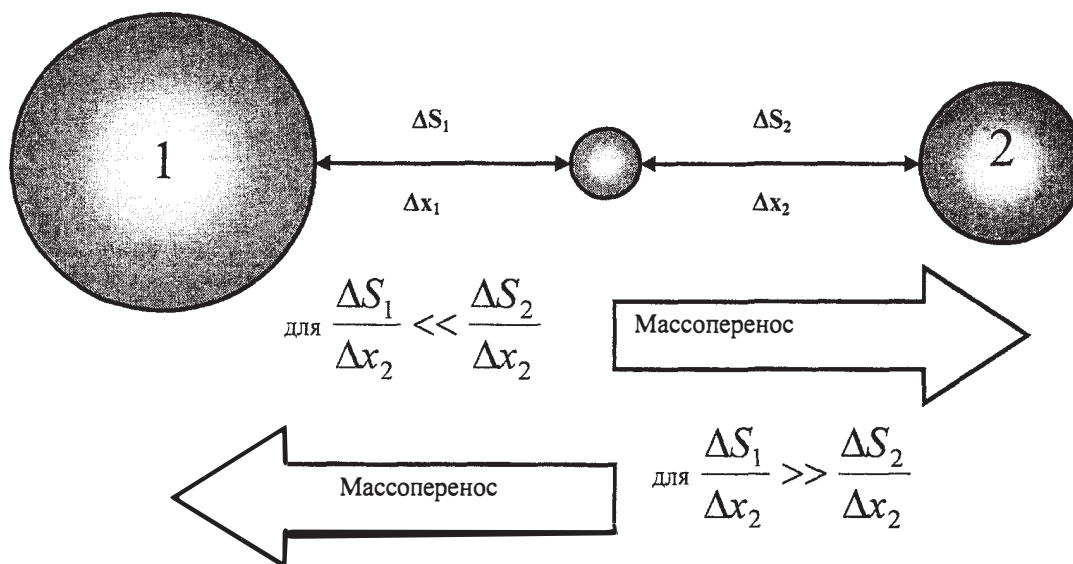


Рис. 6. Направление массопереноса в условиях конкуренции центров роста с разной растворимостью (S) и с разным расстоянием до малоразмерной частицы (x)

В геле, в силу неподвижности частиц, для каждого центра роста окружение из малоразмерных частиц оказывается статичным. В этой ситуации высокая начальная скорость роста кристаллов уже не имеет решающего значения в конкуренции за материал. В самом деле, на величину градиента концентрации растворенного вещества оказывает влияние как различие в растворимости, так и расстояние между кристаллами. Поэтому в реальных условиях рекристаллизации может сложиться ситуация, когда более интенсивный массоперенос может осуществляться между близкими частицами, обладающими малым различием в растворимости, по сравнению с массопереносом между удаленными частицами, значительно различающимися по размеру (рис. 6).

Кроме того, массоперенос между разноразмерными частицами может быть вообще заблокирован в ситуации, когда они удалены на слишком большое расстояние ($\Delta x \rightarrow \infty$) или когда их различие в растворимости пренебрежимо мало ($\Delta S \rightarrow 0$). Таким образом, можно утверждать, что при задан-

ных размерах крупного и малоразмерного МК для протекания массопереноса необходимо, чтобы величина градиента концентрации в пространстве между двумя взаимодействующими частицами была выше критического (ненулевого) значения (K_{grad}):

$$\frac{\Delta S}{\Delta x} \geq K_{grad} \quad (3)$$

Из этого следует, что в бимодальной системе растворение малых частиц в ходе их взаимодействия с крупными может происходить с заметной скоростью только в том случае, если эти малоразмерные частицы находятся внутри области эффективного массопереноса, т. е. сферы, центром которой является крупная частица, а радиус определяется соотношением:

$$r_{eff} = \frac{S_F - S_L}{K_{grad}} \quad (4)$$

где S_F и S_L - растворимость (поверхностная концентрация растворенного вещества) для малых и круп-

ных кристаллов соответственно. Как следствие, для каждого центра роста в геле существует предельный размер области, в которой он может создать значение градиента концентрации растворенного вещества выше критического. Эта зона и будет зоной эффективного массопереноса для данного типа центра роста (рис. 7). В ходе роста кристалла, по мере увеличения геометрического размера, происходит

дальнейшее снижение его растворимости в соответствии с уравнением Гиббса-Томсона (1), следствием чего является дальнейшее расширение области эффективного массопереноса. Однако это расширение в любом случае оказывается ограниченным, что обусловлено логарифмическим характером зависимости растворимости от размера.

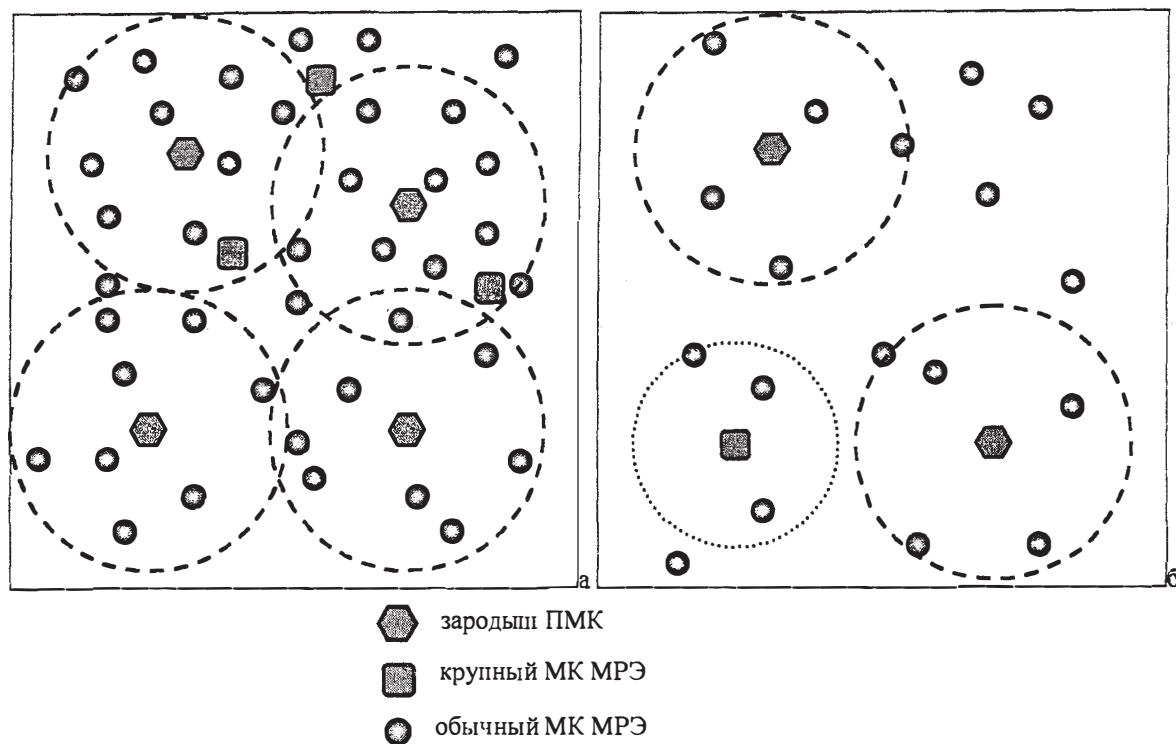


Рис. 7. Протекание рекристаллизации МРЭ в среде геля в случае высокой (а) и низкой (б) концентрации частиц в системе (пунктиром обозначены границы зоны эффективного массопереноса)

Если при рекристаллизации в гелевой среде в область эффективного массопереноса попадает достаточное количество малоразмерных кристаллов, то процесс роста может продолжаться вплоть до полного исчерпания строительного материала в системе (т. е. когда в ней не останется малых МК). В противном случае, укрупнение центра роста может быть обеспечено только за счет малоразмерных частиц, находящихся в непосредственной близости от крупного. После растворения этих ближайших кристаллов система переходит в псевдостационарное состояние (рис. 7б).

Таким образом, решающее влияние на результаты рекристаллизации в гелевой среде оказывает именно межчастичное расстояние. При высокой концентрации микрокристаллов (низком межчастичном расстоянии) возможен неограниченный рост наиболее быстрорастущих частиц. Напротив, при низкой концентрации микрокристаллов имеет место успешная конкуренция за материал между медленно растущими и быстрорастущими частицами (т. е. зародышами таблитчатых кристаллов и обычными малоразмерными кристаллами с размером выше среднего). Поэтому морфология кристаллов, получаемых в результате рекристаллизации в геле при

высокой и при низкой концентрации частиц, может существенно различаться (рис. 4).

Полученные экспериментальные данные недвусмысленно указывают на то, что при определенных условиях при массовой кристаллизации в бимодальной системе морфология итоговых частиц может в значительной степени определяться процессами взаимодействия малоразмерных частиц между собой. Поэтому и общая модель процесса массовой кристаллизации должна строиться с обязательным учетом возможности протекания процессов рекристаллизации непосредственно между малоразмерными частицами (эмбрионами).

Теоретическая модель массовой кристаллизации бромида серебра

Опираясь на вышеизложенное, можно разработать новый подход к описанию закономерностей протекания массопереноса в ходе синтеза AgBr фотозумльсии методом контролируемой двухструйной кристаллизации (см. схему на рис. 1). Отметим еще раз, что, в соответствии с базовой моделью Бери, массоперенос в этом случае является полным аналогом массопереноса при физическом созревании в бимодальной системе. Единственное отличие заключается в том, что в ходе проведения КДК в

системе происходит непрерывная генерация малоразмерных частиц.

Можно полагать, что размер, а значит и растворимость новообразующихся малоразмерных частиц – эмбрионов, мало зависит от условий проведения кристаллизации. Это обусловлено тем, что определяющее влияние на размер эмбрионов оказывает очень высокий уровень пересыщения реакционной смеси в точке введения реагентов. Таким образом, описываемая система оказывается бимодальной: в ней присутствуют центры роста (крупные кристаллы) и малоразмерные частицы с приблизительно постоянным размером, которые служат материалом для укрупнения больших частиц. После выхода на стационарный режим устанавливается динамическое равновесие между числом новообразующихся и растворяющихся эмбрионов. В этих условиях средняя концентрация малоразмерных частиц в системе становится постоянной.

Можно ожидать, что при не слишком высокой концентрации центров роста большая часть системы будет приходиться на околостранственное окружение эмбрионов – межэмбриональное про-

странство (см. схему на рис. 8). В этом пространстве объемная концентрация растворенного вещества будет совпадать со средней поверхностной концентрацией для малоразмерных частиц. В то же время сами эмбрионы могут участвовать в Оствальдовском созревании, которое приводит к изменению их среднего размера. Следует особо отметить, что процессы собственной рекристаллизации эмбрионов интенсифицируются при увеличении их частичной концентрации (т. е. снижении межчастичного расстояния).

В окрестностях крупных кристаллов – центров роста – расположена зона, в которой существует градиент концентрации, обуславливающий массоперенос растворенного вещества по направлению к этим центрам. За счет экранирующего эффекта протяженность зоны интенсивного массопереноса не может превышать среднего межчастичного расстояния для эмбрионов. В свою очередь, изменять это расстояние можно путем варьирования скорости введения реагентов (концентрации эмбрионов).

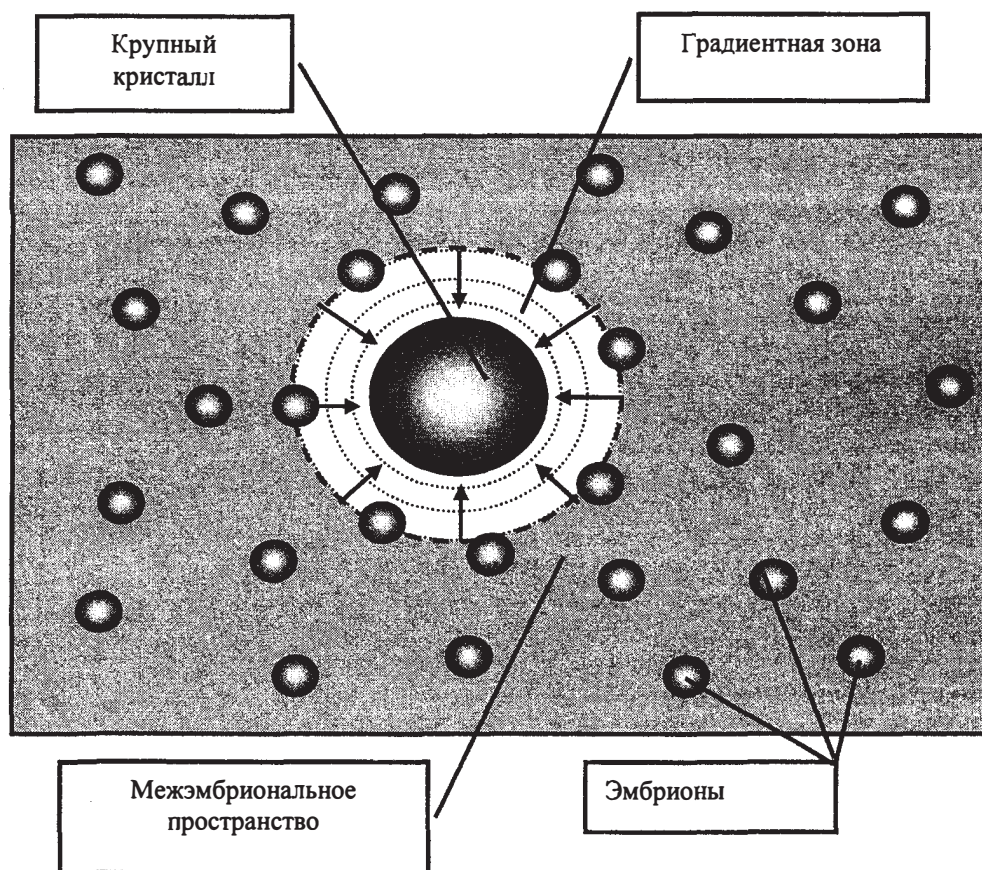


Рис. 8. Взаимодействие растущих кристаллов и эмбрионов в ходе контролируемой двухструйной кристаллизации

В рамках данной модели можно дать новую интерпретацию данным о критической скорости введения реагентов, полученные Вэйем и Стронгом. Она сводится к следующим положениям:

1. При равной концентрации центров роста в системе более крупные кристаллы будут более эф-

фективно поглощать эмбрионы. Более того, более крупные кристаллы могут успешно акцептировать даже успевшие укрупниться за счет межэмбрионального взаимодействия частицы, поэтому допустимой является более высокая концентрация эмбрионов в системе.

2. Поэтому для более крупных кристаллов при равной частичной концентрации допустимой (без риска новообразования кристаллов) является более высокая скорость введения реагентов (при этом концентрация самих эмбрионов в межэмбриональном пространстве, разумеется, выше, т. е. пересыщение системы по AgBr выше).

3. Более высокая концентрация эмбрионов уменьшает протяженность градиентной области вокруг растущих кристаллов и увеличивает объем межэмбрионального пространства (его долю в объеме реакционной смеси). Протяженность градиентной области соответствует величине диффузионного пути и равна среднему межэмбриональному расстоянию. В то же время условия на границе градиентной области меняются, так как при снижении межэмбрионального расстояния средний размер эмбрионов может начать расти.

4. По мере увеличения скорости введения реагентов, концентрация эмбрионов становится такой высокой, а продолжительность их пребывания в межэмбриональном пространстве становится такой продолжительной, что за счет Оствальдовского созревания самих эмбрионов формируются частицы, которые уже не растворяются при взаимодействии с крупными кристаллами, и продолжают свой рост в межэмбриональном пространстве. Эти частицы являются стабильными зародышами новой фазы. Сам процесс новообразования частиц аналогичен обычному зародышеобразованию. На основании извест-

ных литературных данных, можно предположить, что новообразование AgBr частиц происходит, когда концентрация эмбрионов превышает пороговое значение, равное 1×10^{13} - 1×10^{14} шт/мл, т. е. при среднем межчастичном расстоянии порядка 100 нм [16].

Что касается механизма роста крупных кристаллов, то, в соответствии с нашими расчетами, существенный рост градиента концентрации растворенного вещества, обеспечивающего наиболее быстрый массоперенос, происходит в условиях максимального сближения большой и малой частиц. Напротив, при увеличении расстояния между взаимодействующими частицами происходит очень быстрое снижение величины градиента. Поэтому наиболее энергично массообмен протекает между частицами, находящимися в непосредственном контакте (контактная рекристаллизация) [17]. По сути, это может означать, что рост микрокристаллов протекает преимущественно по агрегационно-коалесцентному механизму. В то же время в конкретном случае бромида серебра протекание интенсивных рекристаллизационных процессов в области контакта кристаллов приводит к полной потере идентичности малоразмерной частицы и достаточно равномерному распределению ее материала по поверхности растущего кристалла. Примеры подобных процессов в ходе роста таблитчатых микрокристаллов бромида серебра представлены на рис. 9.

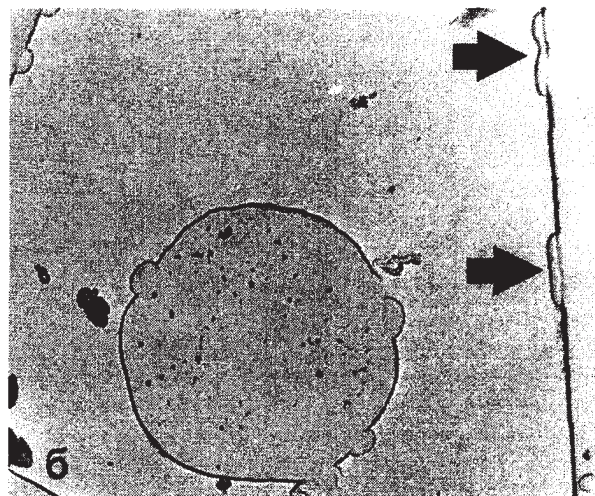
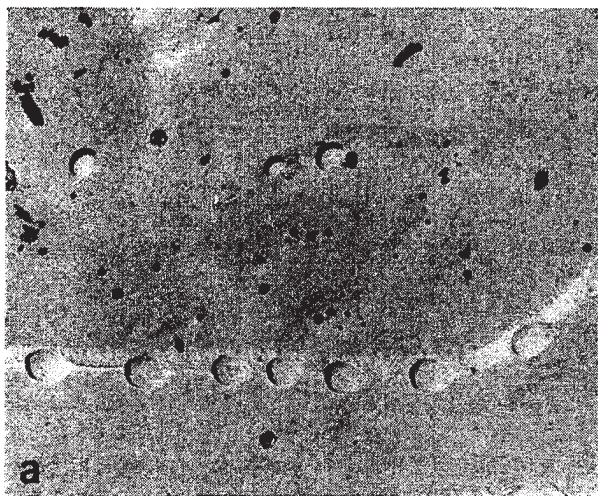


Рис. 9. Протекание процессов агрегации (а) и коалесценции (б) малоразмерных кристаллов с торцевой гранью растущего ПМК в ходе физического созревания [14]

В рамках предлагаемой модели находит разумное объяснение также и факт снижения однородности крупных кристаллов в случае снижения скорости введения реагентов [18]. Вэй и Стронг трактуют это явление как результат изменения критического размера частиц при снижении уровня среднего пересыщения в системе. Однако, если следовать логике авторов, то, по мере снижения скорости введения реагентов, величина критического радиуса все больше приближается к размеру самых больших кристаллов в системе. Поэтому, после прекращения подачи реагентов (близкое к нулю пере-

сыщение), можно ожидать интенсификации процессов Оствальдовского созревания между имеющимися крупными кристаллами. На практике, однако, процессы массообмена между крупными кристаллами в закрытой системе протекают с очень медленной скоростью.

По нашему мнению, замедление скорости роста меньших кристаллов обусловлено тем, что при низкой скорости введения реагентов пониженное количество эмбрионов в межэмбриональном пространстве уже не может эффективно изолировать друг от друга разные по размеру центры роста.

В результате меньшие по размеру кристаллы начинают проигрывать в конкуренции за материал для роста за счет взаимодействия с крупными частицами по механизму Оствальдовского созревания.

Что касается массовой кристаллизации в "переполненной" системе [12], то в данном случае можно ожидать существенного снижения объема системы, приходящегося на межэмбриональное пространство. В этой ситуации значительно снижается интенсивность межэмбрионального взаимодействия, и, как следствие, снижается вероятность генерации крупных частиц, возникающих в ходе данного взаимодействия. Поэтому для "переполненной" системы допустимой становится более высокая скорость введения реагентов.

Совершенно аналогичным образом можно описать рекристаллизацию при выращивании кристаллов методом физического созревания в бимодальной системе. Скорость укрупнения крупных кристаллов – центров роста – и в этом случае тем больше, чем больше их различие в растворимости с малыми кристаллами и чем меньше межчастичное расстояние в системе. Благодаря тому, что в растворе МК могут свободно двигаться друг относительно друга, количество малоразмерных кристаллов в области эффективного действия градиента концентрации вокруг центров роста поддерживается на высоком уровне. Однако в случае, если в системе в течение достаточно длительного времени концентрация малоразмерных кристаллов остается слишком высокой (например, если концентрация крупных кристаллов низка и, как следствие, их рост оказывается слишком продолжительным), то за счет протекания Оствальдовского созревания в среде самих малоразмерных кристаллов могут возникнуть достаточно крупные частицы с растворимостью, сопоставимой с растворимостью крупных кристаллов. Подобные частицы уже не исчезают и продолжают укрупняться наряду с исходными центрами роста.

Подводя итог, можно отметить, что предложенная в данной работе модель строго вытекает из теоретической схемы Берри. Единственное принципиальное отличие от разработанных ранее моделей заключается в том, что мы постарались учесть процессы собственного взаимодействия малоразмерных частиц между собой. Однако принятие этого положения позволило с единых позиций адекватно описать широкий круг явлений, связанных массовой кристаллизацией галогенидов серебра в различных условиях.

Литература

- Бреслав, Ю. А. 150 лет классической технологии фотографических эмульсий / Ю. А. Бреслав // Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. – 1989. – Т. 34. – Вып. 4. – С. 243-253.
- Джеймс, Т. Х. Теория фотографического процесса / Т. Х. Джеймс. – Л.: Химия. – 1980. – 672 с.
- Baldyga, J. Mixing-Precipitation Model with Application to Double Feed Semibatch Precipitation / J. Baldyga, W. Podgorska, R. Pohorecki // Chemical Engineering Science. – 1995. – V. 50, No. 8. – P. 1281-1300.
- Berry, C. R. A New Model for Double-Jet Precipitation // Photographic Science and Engineering. – 1976. – Vol. 20, No. 1. – P. 1-4.
- Voorhees, P. W. The Theory of Ostwald Ripening // Journal of Statistical Physics. – 1985. – V. 38, No. 1/2. – P. 321-252.
- Wey, J. S. Growth Mechanism of AgBr Crystals in Gelatin Solution / J. S. Wey, R. W. Strong // Photographic Science and Engineering. – 1977. – Vol. 21, No. 1. – P. 14-18.
- Sugimoto, T. Stable Crystal Habits of General Tetradecahedral Microcrystals and Monodisperse AgBr Particles. I. Equilibrium Form and Steady Form // Journal of Colloid and Interface Science. – 1983. – Vol. 91, No. 1. – P. 51-68.
- Bogg, T. G. Studies of Ostwald Ripening of a Model Silver Bromide Emulsion System / T. G. Bogg, M. J. Harding, D. N. Skinner // Journal of Photographic Science. – 1976. – Vol. 24. – P. 81-95.
- Wey, J. S. Ostwald Ripening of AgBr Crystals in Gelatin Solution / J. S. Wey, M. J. Schad // Journal of Imaging Science. – 1986. – Vol. 30, No. 5. – P. 193-197.
- Харитонов, А. И. Теория двухструйной эмульсификации / А. И. Харитонов // Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. – 1983. – Т. 28. – Вып. 3. – С. 226-239.
- Ларичев, Т. А. О формировании галогенсеребряных табличатых кристаллов методом рекристаллизации в желатиновом геле / Т. А. Ларичев, Е. В. Просвиркина // Журнал научной и прикладной фотографии. – 1999. – Т. 44. – Вып. 3. – С. 6-11.
- Jagannathan, R. Diffusion-Controlled Growth in a Crowded Environment / R. Jagannathan, J. S. Wey // J. Cryst. Growth. – 1981. – V. 51. – P. 601-606.
- Larichev, T. A. Recrystallization of Isometric AgBr Microcrystals in Gelatin Gel / T. A. Larichev, E. V. Prosvirkina, M. Y. Young, H. C. Ahn // Journal of Imaging Science and Technology. – 2001. – V. 45, No. 3. – P. 241-246.
- Щукин, Е. Д. Коллоидная химия / Е. Д. Щукин, А. В. Перцев, Е. А. Амелина. – М.: Высшая школа, 2004. – С. 335.
- Ларичев, Т. А. О роли коалесцентного и ионного механизмов в процессе роста AgHal табличатых кристаллов / Т. А. Ларичев, Е. И. Кагакин // Журнал научной и прикладной фотографии. – 1999. – Т. 44. – Вып. 3. – С. 12-18.
- Leubner, I. H. Crystal Growth and Renucleation: Theory and Experiment // J. Imag. Sci. Tech. – 1993. – V. 37, No. 5. – P. 510-516.
- Sugimoto, T. G. Yamaguchi, Contact Recrystallization of Silver Halide Microcrystals in Solution, J. Cryst. Growth. – 1976, № 34. – P. 253-262.
- Wey, J. S. R. W. Strong, Influence of the Gibbs-Thomson Effect on the Growth Behavior of AgBr Crystals // Photographic Science and Engineering. – 1977. – V. 21, No. 5. – P. 248-252.