

ФРАКТАЛЫ В ЛИОТРОПНЫХ СИСТЕМАХ

Р.И. Минц, С.А. Скопинов,
С.В. Яковлева

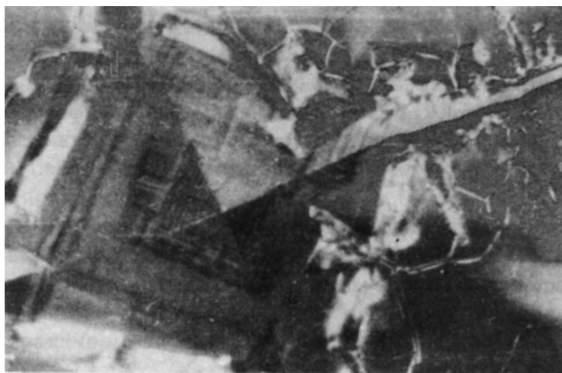
При кристаллизации жидкостей на подложке в квазидвумерных условиях в случае сильно-неравновесного процесса (большие скорости и резкие градиенты концентрации) наблюдается образование разветвленных, фрактальных [1] структур с масштабным повторением характерных морфологических особенностей. Физические причины возникновения таких структур обычно интерпретируют в рамках модели „агрегации ограниченной диффузии“ [2]. Образование фракталов наблюдается также при кристаллизации солей в матрице биологических жидкостей [3], представляющих собой растворы липид-белковых агрегатов. Характерно, что водный раствор соли в аналогичных, близких к равновесным, условиях кристаллизации дает обычные кубические кристаллы.

В настоящей работе методом поляризационной микроскопии исследованы фрактальные структуры в системах типа вода-соль-белок и установлено, что в таких системах реализуется механизм фрактальной кристаллизации, обусловленный фазовым расслоением солевого и органического компонентов раствора.

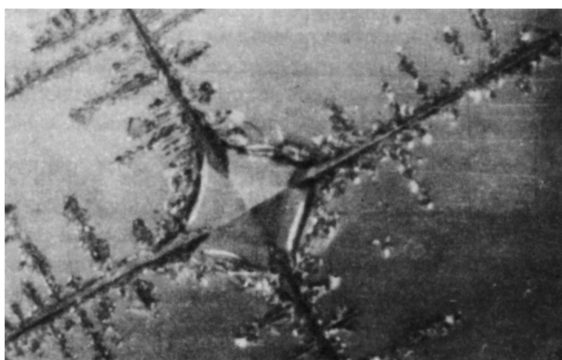
В качестве объектов исследования использованы растворы типа вода- $NaCl$ -альбумин и вода- $NaCl$ -протеин, на основе выпускаемых отечественной фармацевтической промышленностью белковых препаратов. В исследованном диапазоне концентраций эти растворы сходны с некоторыми биологическими жидкостями (например, ликвором). Для исследования процесса кристаллизации капля раствора с фиксированным объемом помещалась на стеклянную подложку, предварительно обработанную слабым раствором лецитина, для создания условий слабой связи с подложкой. Полученные образцы выдерживались при температуре 20 ± 0.5 °C в темноте в камере объемом 400 см^3 в течение суток до полной фиксации кристаллизационной структуры. Исследование образовавшихся структур проведено в поляризованном свете на микроскопе МБИ-15 при увеличении в 160 раз.

На рис. 1 приведены микрофотографии, снятые в скрещенных поляризаторах образцов 1 (альбумин- $NaCl$ -вода) и 2 (протеин- $NaCl$ -вода) с различными концентрациями белка.

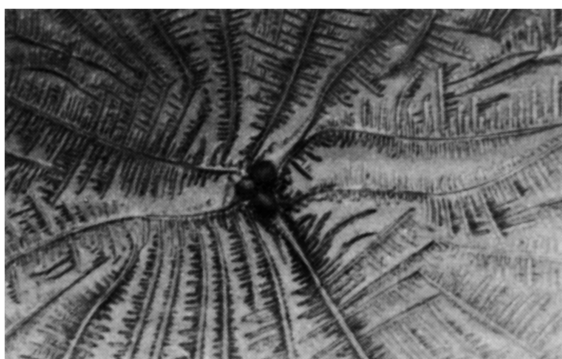
В системах с малой концентрацией белка (рис. 1,а) при кристаллизации образуются кубические кристаллы $NaCl$ со следами дислокационного роста. По периметру кристалл соли декорирован упорядоченными областями белка, в скрещенных поляризаторах регистрируемые в виде участков светлого поля вследствие значительного двулучепреломления. Раздельная кристаллизация соли и белка (или их фазовое расслоение) накладывает ограничения на размеры кристалла соли, т.к. при образовании непроницаемой для ионов Na^+ и Cl^-



a



б



в

Рис. 1. Концентрационно-индуцированная кристаллизация на подложке в системе вода-соль-белок. Концентрация *NaCl* - 9 г/л. Исходная концентрация белка: а - 10 г/л (протеин), б - 15 г/л (протеин), в - 18 г/л (альбумин).

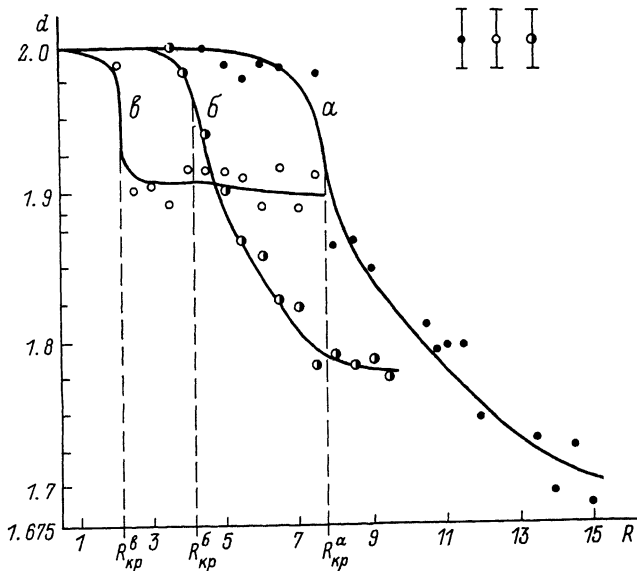


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности d от радиуса окружности R , описывающей центр масс для структур, представленных на рис. 1.

белковой „шубы“ дислокационный рост кубического кристалла $NaCl$ останавливается. Поэтому размер кубического кристаллита $NaCl$ в стадии дислокационного роста тем больше, чем меньше относительная концентрация белка (см. рис. 1, а и б).

Стерические затруднения, обусловленные необходимостью выталкивать белковую фазу по периметру кристаллита, а также неоднородность фазового состава системы по глубине (кристаллизация белка начинается от подложки) приводят к модификации кристаллизационного процесса. Последующий рост происходит не по периметру кристалла-зародыша, а линейно – вдоль направлений, задаваемых ориентацией его ребер (рис. 1, а). Это позволяет минимизировать энергетические потери, связанные с деформацией вязкой белковой „шубы“ растущего фрактала. В системах с высокой концентрацией белка переключение дислокационный механизм – фрактальный рост происходит на ранних стадиях процесса кристаллизации, и в системе создаются условия для завершения формирования первичных и вторичных (рис. 1, б) линейных структур. Поскольку рост вторичных и последующих линейных структур происходит в направлении градиента вязкоупругих характеристик белковой „шубы“ фрактала, совпадающего с нормалью к направлению линейного роста „материнского“ структурного элемента, то процесс кристаллизации представляет собой постадийное деление пространства вокруг кристалла-зародыша сеткой масштабных линий. Пространственные неоднородности, флукту-

ации скорости роста и конкуренция различных „ветвей“ фрактального дерева приводят к искажениям исходной ориентации, а также подавлению или гипертрофированному развитию некоторых структурных элементов фрактала (рис. 1, в). Все это вместе с дефектами кристалла-зародыша (рис. 1, в) обуславливает отклонения реальной масштабной сетки от идеализированной регулярной системы взаимоперпендикулярных линий.

Обычно в качестве основной характеристики структуры подобного типа используется ее фрактальная размерность d , определяемая соотношением $M \sim R^d$, где M – масса фрактала, R – радиус окружности, описывающей фрактал, относительно его центра масс. Величина d ограничена значениями в интервале $1 < d \leq 2$ [4]. Для структур (рис. 1) d как функция R в динамике их роста испытывает резкий скачок от исходного значения 2 к величинам (1.9–1.7), причем скачок d тем резче, чем больше критическое значение $R_{кр}$ (рис. 2). Величина $R_{кр}$ характеризует пространственный масштаб, на котором в динамике кристаллизации происходит переход дислокационный рост – фрактальный рост, а $d_{кр}$ – плотность заполнения пространства в образовавшемся фрактале. Легко видеть, что с ростом концентрации белка первая величина падает, а вторая растет.

Представленные результаты позволяют заключить, что в водносолевых растворах белков реализуется механизм фрактального роста, обусловленный в первую очередь не неравновесностью кристаллизации, а возникающей в процессе ее неоднородностью пространства вследствие фазового расслоения соли и белка. Обнаруженная регулярность структуры фракталов и зависимость ее характерных параметров от относительной концентрации белка указывает на возможность создания методики управляемой фрактальной самосборки поверхностных структур белков для задач биомолекулярной электроники.

Л и т е р а т у р а

- [1] M o n d e l b r o t B.B. The Fractal Geometry of Nature, W.H. Freeman and Co, N. – Y., 1983. 468 p.
- [2] W i t t e n T.A., S a n d e r L.M. – Phys. Rev. B., 1983, v. 27, N 9, p. 5686.
- [3] A n d e r s o n U.E., R e i d B.L. – Appl. Phys. Commun., 1984, v. 4, N 2–3, p. 247.
- [4] Fractals in Physics, Ed. Pictronerio L. Tosatti Er., N.–Y., 1986. 200 p.

Уральский политехнический институт им. С.М. Кирова

Поступило в Редакцию
5 сентября 1988 г.