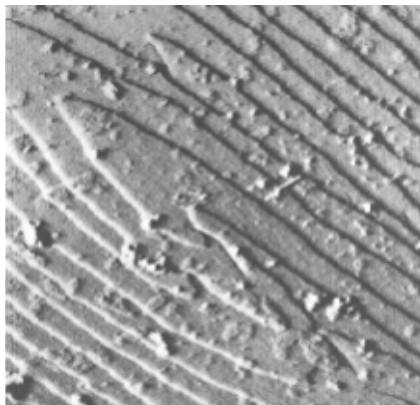


– дело очень тонкое. До сих пор так и не удалось кристаллизовать многие белки. Кристаллы лизоцима растут из насыщенного раствора только в строго определенных условиях, например в узком температурном интервале. В раствор лизоцима надо добавить немного поваренной соли NaCl. Кроме того, для успешного роста кристалла необходима добавка некоторого количества соляной кислоты HCl. Ионы Cl⁻ активируют лизоцим, а при их отсутствии его активность резко падает.

После изобретения атомно-силового микроскопа¹ стало возможным непосредственно увидеть, как молекулы лизоцима упакованы на гранях кристалла (рис.1). В атомно-силовом микроскопе игла, закрепленная на упругой микропластине, скользит по поверхности исследуемого образца. По изгибу микропластины, который регистрируют с помощью оптической системы, судят о высоте объекта. С помощью такого микроскопа удалось увидеть периодическую атомную решетку на поверхности кремния, графита, слюды, различных полупроводников и металлов.

Возможности атомно-силового микроскопа, однако, не безграничны, и поэтому визуализировать отдельные атомные дефекты в виде отсутствия или наоборот наличия одного дополнительного атома на поверхности, как правило, не удается. А потребность наблюдения таких одиночных дефектов велика, например для изучения молекулярных механизмов роста кристаллов. Если знать законы роста кристаллов на уровне отдельных атомов, то можно делать совершенные кристаллы больших размеров. А это уже необходимо для различных прикладных задач, например в ювелирном деле при выращивании синтетических драгоценных камней. Здесь можно упомянуть и о разработке в Лос-Аламосе, где пытаются вырастить кристаллы калия дигидрофосфата размером почти в один метр. Такие кристаллы нужны для нелинейного преобразования лазерного света при создании установки управляемого термоядерного

¹ Устройство этого микроскопа во многом аналогично устройству сканирующего туннельного микроскопа, о котором можно прочитать, например, в статье И.Яминского «Закон Ома для разомкнутой цепи и ... туннельный микроскоп», опубликованной в «Кванте» №5 за 1999 год. (Прим. ред.)



4,7 мкм

Рис.2. Изображение дефекта на поверхности кристалла лизоцима – винтовой спирали. Размер участка поверхности порядка микрометра, высота ступенек соответствует размеру одной молекулы

синтеза. Для работы такой установки необходимы 40 совершенных кристаллов метровых размеров.

При изучении вопросов роста кристаллов неожиданным образом на помощь пришел лизоцим. У большинства неорганических кристаллов строительными кирпичиками являются отдельные атомы, размеры которых составляют доли нанометра. Другое дело молекулы лизоцима – они почти в 100 раз больше. Из-за больших размеров белковых моле-

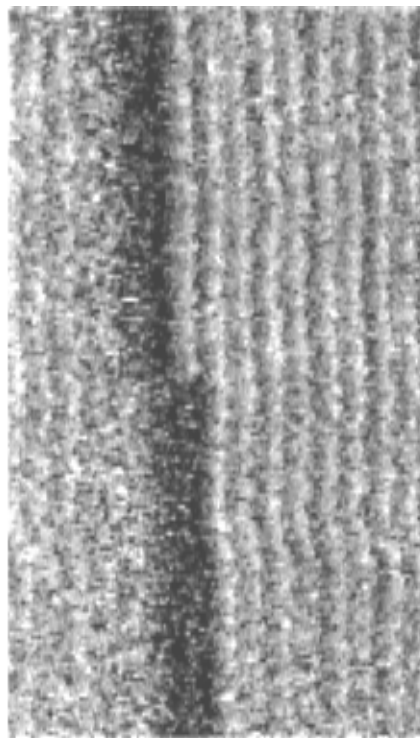


Рис.3. Молекулы лизоцима встраиваются в изломы на ступенях. На рисунке представлен излом шириной в одну молекулу

кул кристалл лизоцима может служить модельной системой при наблюдении роста кристаллов в атомно-силовой микроскоп. Ведь законы роста у неорганических и органических кристаллов одни и те же, поэтому для микроскопии лучше выбирать такие кристаллы, строительные единицы которых имеют больший размер. Тогда в атомно-силовом микроскопе можно с молекулярным разрешением наблюдать структуру дефектов (рис.2), видеть элементарные ступени и изломы на них (рис.3.).

Уникальные возможности атомно-силового микроскопа состоят в том, что он позволяет наблюдать за состоянием поверхности образца не только в воздухе или вакууме, но и в жидких средах. В случае растущего кристалла это позволяет, снимая кадр за кадром через небольшие промежутки времени, смотреть, как двигаются элементарные ступени, и измерять абсолютную скорость движения этих ступеней. На рисунке 4 представлена серия кадров, снятых с интервалом в 50 секунд. Ступени двигаются в направлении слева направо, скорость их движения составляет 5 нм/с. Эти наблюдения были недавно проведены автором статьи вместе с коллегами Л.Н.Рашковичем и Н.В.Гвоздевым на кафедре физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Итак, судьба лизоцима оказалась вполне успешной – его хорошо изучили, его используют в полезных случаях, а самое главное – он часто встречается в живой природе и выполняет там жизненно важные функции. Но нельзя сказать, что про него все известно и не будет новых открытий. Подтверждение тому – новый факт о структуре кристалла лизоцима, недавно обнаруженный с помощью атомно-силового микроскопа. Раньше считалось, что в элементарную ячейку ромбического кристалла лизоцима входит лишь одна молекула. Наблюдения в атомно-силовой микроскоп показали, что геометрические центры соседних молекул лизоцима в одном слое имеют некоторое смещение. Кроме того, молекулы в соседних слоях ориентированы по-разному. На это указывает измерение сил трения на соседних молекулярных слоях роста: каждый второй слой выглядит чуть более шероховатым, чем промежуточные