

03; 05

© 1991 г.

АВТОВОЛНОВОЙ ПРОЦЕСС В ДИНАМИКЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В ПЛЕНКЕ БЕЛКА

Е. Г. Рапис, Г. Ю. Гасанова

Изучалась динамика рождения упорядоченной морфологической структуры при отвердевании капли белка. Методика состояла в динамическом микроскопическом анализе и фотографировании через равные промежутки времени пленки яичного белка, помещенного на стеклянную подложку при температуре 27 °С.

Проведенные опыты показали, что при высыхании пленки белка образуется геометрически упорядоченная структура («розетка высыхания») с закономерным направлением трещин и волновым процессом в каждом «блоке», имеющим свойства автоволн. Таким образом, установлено, что фазовый переход белка из жидкости в твердое состояние происходит через автоволновой процесс, который в большой степени определяет морфологию «розетки высыхания» белка.

Постановка задачи

Одной из исходных и простейших задач синергетики [1, 2] является установление факта самоорганизации и автоволнового процесса [3]. Последний характеризуется наличием самоподдерживающихся волн (автоволн), которые образуются в активных средах, обладающих постоянно сохраняющимся источником энергии. При этом установлено, что автоволновые источники представляют собой волны или ревербераторы [4]. Именно такие спиральные волны позднее экспериментально обнаружены также в ткани сердечной мышцы, в сетчатке глаза, в коре головного мозга и в биологических популяциях [5, 6].

Автоволновой процесс раньше всего был обнаружен в химической реакции Белоусова, а затем в специально созданной А. И. Заикиным и А. М. Жаботинским в 1970 году химически активной среде [4], позже он установлен во многих других различных проявлениях природы, и в частности при фазовых переходах. Несмотря на утверждение в последние годы биофизиков, что автоволны играют важную роль в процессах «самопостроения» биологических организмов или процессах морфогенеза [2], однако до сих пор осталось неизученным поведение неживого белка в процессе его отвердевания, т. е. фазового перехода из жидкого (раствор) в твердое состояние, при котором образуется упорядоченная морфологическая структура, обнаруженная нами в 1973 г. При этом в отличие от описания [3], где считается, что при высыхании капли белка образуется морщинистый узор, мы установили определенную закономерность, состоящую в том, что при высыхании белка различного вида на стеклянной (смачиваемой белком) подложке неизбежно возникает серия блоков, напоминающих «клетки», разьединенные трещинами с центрами, как бы «ядрами», в виде спирали. В поляризованном свете эта спираль имеет двойное лучепреломление и темный крест погасания [7-9]. Картину высушенной капли мы назвали «розеткой высыхания» (по аналогии с «розеткой спекания» [10]). Само собой разумеется, что эти данные могут в какой-то степени характеризовать закономерности кооперативных движений молекул белка или их агрегатов в открытой системе в процессе их самоорганизации.

Исходя из этого возникла задача раскрыть кинетику морфогенеза пленки белка и попытаться выяснить причину обнаруженной закономерности образования упорядоченной морфологической структуры при его высыхании.

Методика эксперимента состояла в следующем: брали несколько равновеликих капель белка различного вида (яичный белок, бычий альбумин, глобулин, гемоглобин человека и кролика), а также исследуемого субстрата другой природы. С помощью иглы со шприцем они помещались на химически чистое предметное стекло и с периодичностью в 1—2 мин микроскопировали каплю в световом микроскопе, а затем фотографировали ее с помощью приставки к микроскопу («Зенит Б»), отражая меняющуюся в динамике картину высыхающей капли белка. В капле белка через 2 мин с периодичностью в 2 мин велось наблюдение за появлением бесцветных, изотропных круговых волн по наружному периметру капли. Через 20 мин с периодичностью в одну минуту велось наблюдение за образованием дугообразных, радиальных и поперечных трещин, располагающихся симметрично и образующих блоки 1-, 2-, 3-го порядков, и за образованием мелких (тонких) розово-голубых волн в каждом формирующемся блоке. С 25-й минуты с периодичностью в 20 мин велось наблюдение за образованием спиральных трещин в центре блока.

Изучалось влияние различных условий на характер «розетки» высыхания белка, в частности проведен опыт с определением структуры такой «розетки» при изменении концентрации белка. Для этого белок (яичный), содержащий 10 % яичного альбумина, разводили последовательно дистиллированной водой в два раза и получали следующие концентрации белка: 1 — 10, 2 — 5, 3 — 2.5, 4 — 1.2, 5 — 0.6, 6 — 0.3, 7 — 0.1, 8 — 0.5, 9 — 0.025, 10 — 0.012, 11 — 0.006, 12 — 0.003, 13 — 0.001 %.

Для определения количественного содержания белка исследуемая капля приготовленного указанным образом раствора или любого биологического их субстрата наносилась на смачиваемую подложку, высушивалась при определенной температуре (37 °С в термостате), высушенная капля микроскопировалась и устанавливалось наличие специфической для белка структуры в наружном периметре капли (блоки с центрами и т. д.) или наличие разнонаправленных трещин по наружному периметру капли при малом содержании белка. При высоком содержании белка вся капля должна иметь указанную структуру. Сопоставляя макро- и микроскопически высоту наружного периметра высушенной капли субстрата с эталонным образцом, устанавливали ответ о содержании белка в процентах, соответствующих биохимическому показателю.

Изучалось влияние различных температурных условий в процессе высыхания пленки белка (капля высыхала при $T = +2, +1, +27, +37$ °С).

В отдельных опытах каплю белка на предметном стекле подвергали воздействию ультразвука (в течение 5 мин с помощью аппарата для ультразвуковой терапии глаза), рентгеновских лучей (175 кВт, в течение 1.5 с, на расстоянии 10 см, аппарат АРД-21) и постоянного магнита.

Проводили опыты с целью выявить характер «розетки высыхания» при смешивании белка с различными веществами с РНК, ДНК и с аминокислотами (триптофан, аланин, аспарагин, глютаминовая кислота). Предварительно изучалась кристаллооптическая картина отвердевшей капли 10%-ных растворов всех указанных препаратов, разведенных физиологическим раствором, а затем смешивали их между собой в той же концентрации (РНК с ДНК, белок с РНК, белок с ДНК, и белок с РНК и ДНК), после чего изучали макроскопически отвердевшую каплю.

Проводили наблюдение за изменением в кристаллооптической картине постепенно разрушающейся структуры белка в крови, смешанной с физиологическим раствором и находящейся в пробирке при комнатной температуре. Забор капли раствора производили на 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50-й день опыта.

Картину высыхающей капли белка на смачиваемой подложке сравнивали с каплей белка, высыхающей на несмачиваемой подложке (пластмасса).

Основные результаты

Динамика морфогенеза высыхающей пленки яичного белка представлена на рис. 1, а—и, из которого видно, что характерные для него морфологические

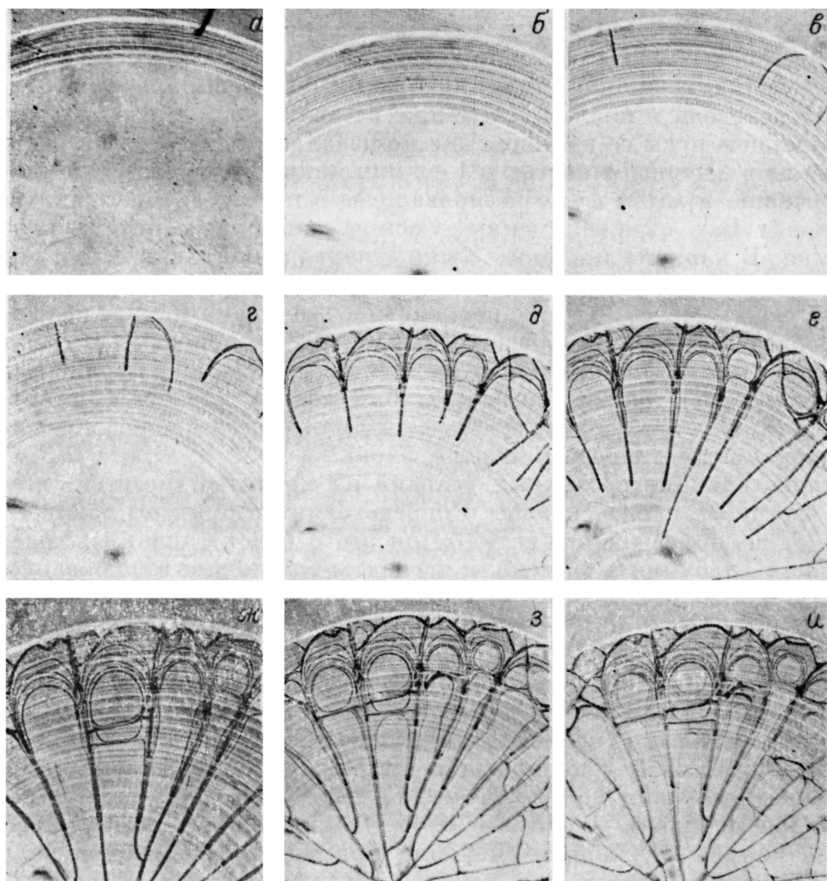


Рис. 1. Микрофотограммы динамики формирования упорядоченной морфологической структуры при высыхании капли белка

Световой микроскоп с увеличением в 10 раз. а — через 2, б — 4, в — 20, г — 22, д — 24, е — 26, ж — 27, з — 28, и через 30 мин после образования капли.

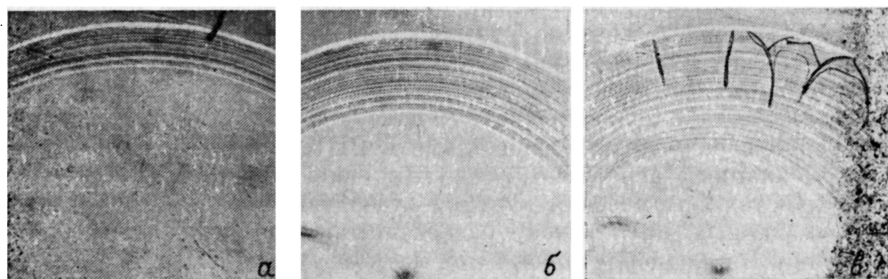


Рис. 2. Образование начальных concentрических волн по всей капле.

Световой микроскоп с увеличением в 10 раз. а — через 2 мин после образования капли, б — через 4 мин количество волн увеличилось, в — через 8 мин появление круговых волн в парацентральной зоне.

признаки формируются через определенные промежутки времени. Концентрические волны по всей капле с наружного периметра появляются через 2 мин после образования капли, они продвигаются к центру через 1—3 с (рис. 2, а—в). Начальные дугообразные и радиальные трещины появляются через 20 мин также с наружного периметра, затем возникают новые через несколько секунд, появляясь с возрастающей скоростью, причем процесс рождения трещин происходит в короткие доли секунды. Сначала образуются радиальные, а затем поперечные трещины (показаны стрелками на рис. 3, б, в) с формированием так

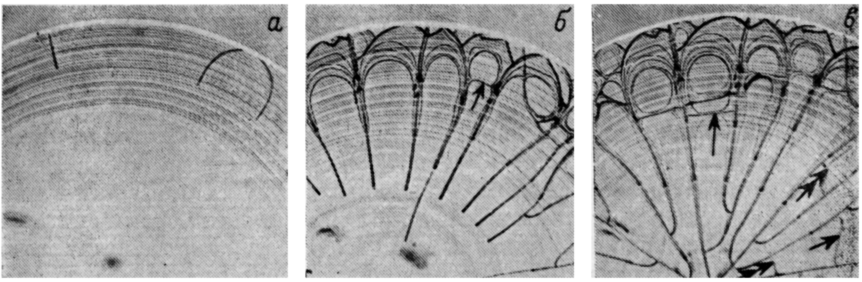


Рис. 3. Образование радиальных и поперечных трещин. Световой микроскоп с увеличением в 10 раз.

a — через 20 мин появление первых дугообразных трещин по наружному периметру, *b* — через 24 мин появление поперечных трещин первого порядка, *v* — через 28 мин появление поперечных трещин второго и третьего порядков.

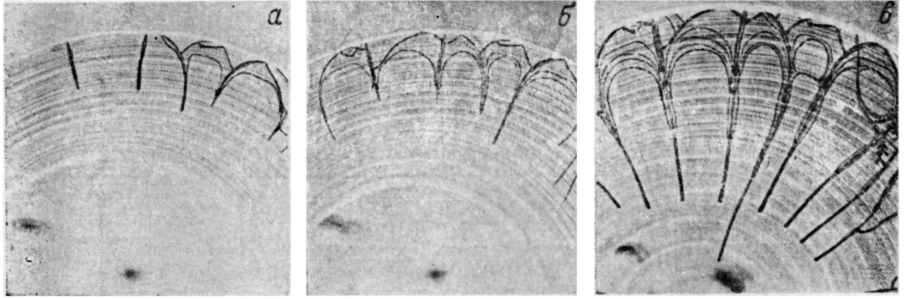


Рис. 4. Формирование мелких волн с розовой и голубой окраской.

Световой микроскоп с увеличением 7×8 . *a* — через 20 мин начало появления волн от дугообразных трещин; *б* — через 21 мин площадь продвижения фронта волн увеличилась, *в* — через 22 мин идущие со всех сторон фронта волны достигают парацентральной зоны, образуя невозбужденное пространство «ядра», идет рождение волн в блоках второго и третьего порядков.

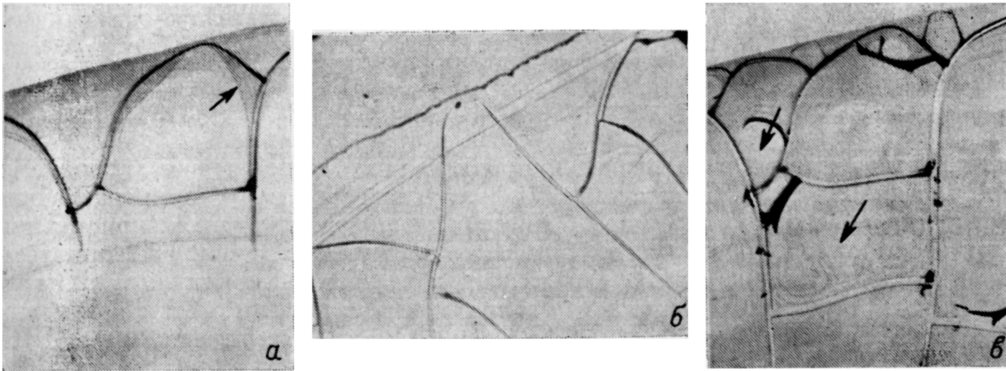


Рис 5. Параллельное друг другу расположение розово-голубых волн, которые формируются в каждом блоке (*a*, *б*) и образуют центры (*в*), как бы «ядра», клеток.

Световой микроскоп с увеличением в 40 раз.

называемых «блоков», или «клеток», первого, второго, третьего и т. д. порядков (рис. 3, *a—в*). Через 20 мин сразу же после образования трещин появляются мелкие розово-голубые волны в каждом формируемом блоке (рис. 4, *a—в*). Как видно из рис. 5, *a—в*, такие волны (показаны стрелкой) располагаются параллельно друг другу, идут от периферии к центру, заполняют почти весь блок, встречаясь с волнами противоположной стороны (от другой трещины), но не сходятся, а образуют в геометрически правильном центре зону, где отсутствуют волны. Эти невозбужденные участки напоминают собой центры, или «ядра», клеток (показаны стрелками на рис. 5, *в*). Следует подчеркнуть, что при столкновении двух волн происходит их полное взаимное погашение (аннигиля-

пия), в связи с чем, по-видимому, в этой зоне рождается трещина (рис. 6, а—в). Вся описанная структура остается затем неизменной при полном высыхании капли. Чаще всего (но не в 100 % случаев) в зоне, окружающей невозбудимые центры, на 30—50-й минуте появляются дугообразные трещины, формирующие спираль. Возникновение новых завитков спирали происходит с промежутками времени через 10—15 мин (рис. 7, а—в).

Таким образом можно качественно выявить присутствие белка при появлении и развитии концентрических волн, идущих по поверхности капли, радиальных и поперечных трещин, образующих блоки, и спиралевидные трещины, не доходящие до центра в каждом из них. Иначе говоря, такая картина позволяет идентифицировать белок, так как она специфична только для высыхаю-

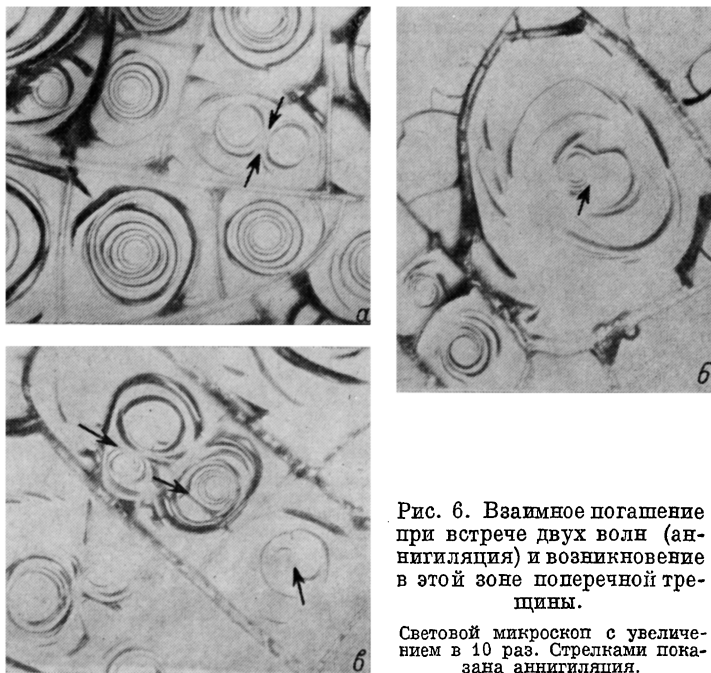


Рис. 6. Взаимное погашение при встрече двух волн (аннигиляция) и возникновение в этой зоне поперечной трещины.

Световой микроскоп с увеличением в 10 раз. Стрелками показана аннигиляция.

щего растворенного белка любой природы и повторяется в нем закономерно при указанных выше условиях в 100 % случаев. Это могут быть различные растворимые белки: альбумин, глобулин, гемоглобин, альфа-кристаллин, а также всевозможные их смеси. При высыхании капель других веществ небелковой природы, а также в белке с разрушенной структурой такой картины не наблюдается. Это относится также и к гелям (агар, кисель и др.) и к различным веществам другой природы (минеральные вещества, аминокислоты, ДНК, РНК и др.).

Опыт показал, что концентрация белка довольно четко и закономерно отражается на кристаллооптической картине капли, сказываясь на объеме наружной каймы ее, получающей только при определенной ее концентрации специфическую для отвердевающего белка структуру с делением на симметричные блоки с волнами и центрами и т. д. Концентрация отражается как на характере морфологической структуры, так и на ширине и равномерности наружной каймы. Таким образом, оказывается, что кристаллооптическая картина капли может иметь прикладное значение, так как она позволяет судить не только о качественном процессе, но и определять процент содержания белка в растворе.

Так, при высыхании капли в 1%-ном растворе белка в отличие от 10%-го блоки были только в два-три ряда (рис. 8, а). Спирали формировались не во всех блоках, нередко в них были только волны, имеющие интерференционную окраску. При высыхании капли 5%-го раствора белка отчетливо выявлялся ободок

капли по наружному периметру, имеющий только продольные трещины, и по периферии наружные «аркады» (округлые дуги) спиралей уже не образовывались. При высыхании капли 2.5%-го раствора белка периферический ободок

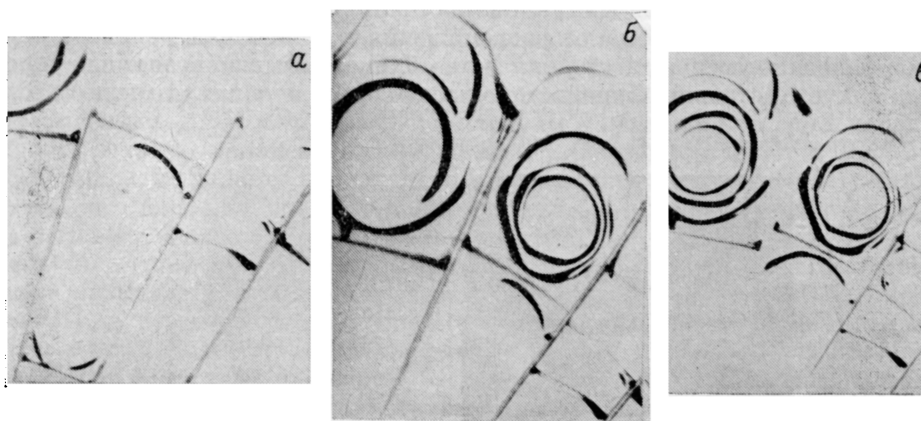


Рис. 7. Формирование центральных спиральных трещин.

Световой микроскоп с увеличением в 10 раз. *a* — через 30 мин появление дугообразных трещин в центральной зоне и витка спирали, *б* — через 60 мин после начала высыхания образование второго витка спирали, *с* — через два часа после начала высыхания образование спиралей с множественными витками.

капли был тоньше, он был разделен неравномерно расположенными трещинами, идущими только продольно. При концентрации яичного белка в 0.1 % высота наружного периметра уменьшилась вдвое по сравнению с разведением 0.2 % и имелись только отдельные неправильные, несимметричные трещины. При концентрации белка 0.01 % уже определялась лишь тонкая «ниточка» наружной каймы без всякой структуры. При высыхании белка при температуре $+37^{\circ}\text{C}$ в отличие от $+27^{\circ}\text{C}$ «розетка высыхания» была особенно симметрична, в ней формирование блоков, или «клеток», происходило почти до самого центра.

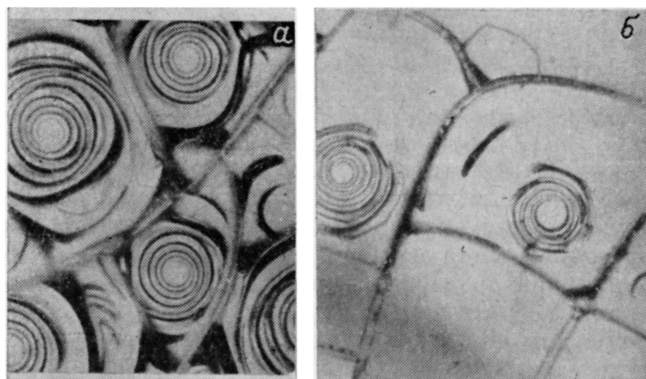


Рис. 8. Сравнительная картина высохшей капли 10- (*a*) и 1%-ных растворов яичного белка (*б*).

Нередко количество блоков в одном сегменте (имеется в виду продольный сегмент, отделенный от другого дислокационной петлей) доходило до 16 в отличие от «розетки высыхания» при $T=+27^{\circ}\text{C}$, где их было только 6-7. Во всех блоках при $T=+37^{\circ}\text{C}$ были сформированы спирали с двойным лучепреломлением. Капля приобретала очень симметричную форму в виде цветка.

При отвердевании капли белка в холодильнике с температурой $+1, +2^{\circ}\text{C}$ формировалась характерная для него «розетка высыхания», но блоки в них были значительно крупнее, количество их уменьшалось, уменьшалось и количество спиральных центров в каждом блоке. Та же самая картина наблюда-

лась, если капля сначала замораживалась при $T = (-3) - (-6) ^\circ\text{C}$, а затем отвердевала при $T = +1 - 2 ^\circ\text{C}$.

Опыты показали, что при воздействии ультразвука и магнитного поля «розетка высыхания» принимала менее симметричный вид. Однако деление на блоки было нерегулярным. Под влиянием постоянного магнита зона капли белка, которая находилась в области расположения наконечника магнита, менялась по морфологии, уменьшалось количество блоков, меньше возникало спиралей, тогда как с противоположной стороны и блоки, и спирали были в обычных пределах.

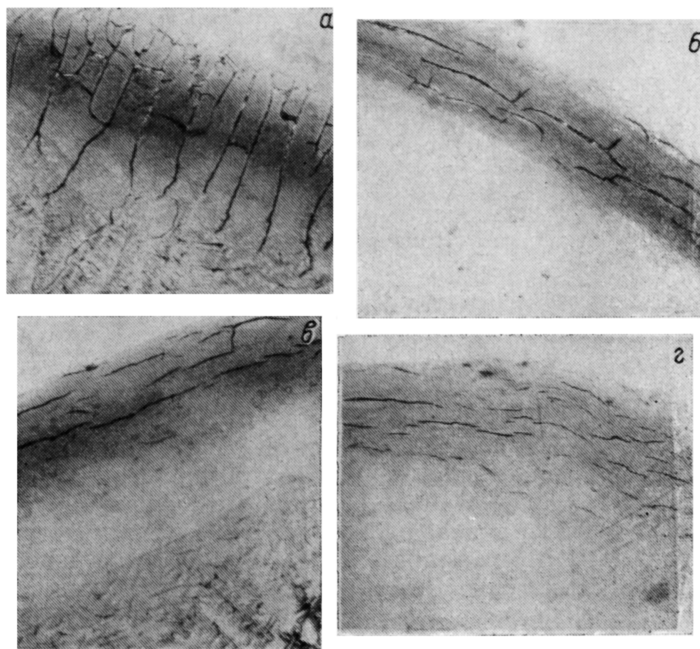


Рис. 9. Изменение кристаллооптической картины белка крови при нарушении его структуры с течением времени.

Световой микроскоп с увеличением 7×8 . а — радиальное расположение трещин в высохшей капле раствора белка с нормальной его структурой, б — неправильное и параллельное наружному периметру капли расположение трещин в высохшей капле раствора белка крови с испорченной структурой, в — исчезновение упорядоченных трещин.

Если отвердевание капли происходило на подложке, не смачиваемой жидкостью, в частности белком, то при высыхании капли замедленно появлялись кольца по всему наружному периметру, затем капля как бы «остеклялась», становилась гомогенной, края ее заворачивались вверх и на 35-й минуте отвердевшая капля отскакивала от подложки.

Все аминокислоты, взятые нами для опыта, давали при отвердевании раствора характерные для каждой из них кристаллические образования, располагающиеся, как правило, по периферии капли. Ни одна из аминокислот и их смесей, высыхая, не приводили к структуре, характерной для белка. Так же вели себя и растворы РНК и ДНК. Однако кристаллы, характерные для РНК, скапливались в центральной зоне высохшей капли раствора, тогда как кристаллические осадки ДНК распределялись равномерно по всей поверхности капли.

При соединении капли белка с разными аминокислотами или их растворами в конкуренции более сильным оказывался белок и он определял морфологию высохшей капли. По ее наружному периметру располагались специфические структуры, а в центральной зоне находились, как правило, анизотропные структуры кристаллов аминокислот.

При соединении капли белка и капли раствора РНК после высыхания капля отпадала так же, как и капля белка, нанесенная на не смачиваемую им поверхность.

При соединении капли раствора ДНК с каплей белка оказалось, что структура, характерная для ДНК, располагалась по периферии отвердевшей пленки в капле. После этого формировалась характерная для белка структура без всякого нарушения с ясно выраженными проявлениями волнового процесса.

При соединении капель раствора РНК и ДНК по наружному периметру, где откладываются кристаллические образования раствора ДНК, в данном случае остается «мертвая зона» и кристаллы, свойственные чистой РНК и ДНК, располагаются только в центре высохшей капли. Получается так, будто бы РНК «стягивает» ДНК и собирает ее молекулы в центральной зоне.

При высыхании капли белка, смешанной с растворами РНК и ДНК, оказалось, что по наружному периметру и в периферических зонах располагалась неизменная, присущая белку кристаллооптическая картина, однако ободок белка был небольшой, примерно в два-три ряда блоков, или клеток, а дальше располагалось поле с кристаллическими формами, присущими ДНК, тогда как в центре находилась зона кристаллов РНК. Получается, что ДНК в присутствии РНК в смеси с белком меняет свою локализацию и также оказывается в центральной зоне капли. Причем в тех опытах, где кристаллические образования ДНК соседствуют с белковыми структурами, ее морфологическая структура нарушается: блоки и спирали как бы «размыкаются», становятся открытыми навстречу ДНК.

Проведенные опыты показывают, что имеются определенные физико-химические закономерности в поведении и расположении таких значимых для биологии веществ, как белок РНК и ДНК, при их свободном самопроизвольном взаимодействии в процессе отвердевания.

Кристаллооптическая картина высохшей капли смеси фаз раствора с кровью резко менялась во времени (рис. 9, а—е). Так, в первые сутки видна была морфология, специфичная для белка, а на 50—60-е сутки, т. е. при полном разложении структуры белка крови, появилась морфология, не свойственная высыхающему белку с нормальной структурой. Видны были только неправильные трещины (рис. 9, з), расположенные концентрически к наружному периметру капли в отличие от обычного радиального их расположения.

Обсуждение

Таким образом, в результате высыхания пленки белка различного вида закономерно наблюдается образование специфической упорядоченной морфологической структуры, напоминающей «розетку» с блоками, имеющими центры в виде «ядер» и спиралей. Симметрия блоков, количество и качественная структура спиралей в центре их зависят в значительной степени от концентрации белка, от сохранности его структуры, от условий образования «розетки высыхания»; от температуры, причем с повышением температуры увеличивается скорость высыхания и качество структурирования улучшается; от подложки, на которой происходит высыхание; от влияния возмущающих воздействий — поля магнита, ультразвука, под влиянием которых уменьшается способность к более полному структурному проявлению в организации «розетки высыхания».

Можно предположить, что кинетика процесса отвердевания пленки белка аналогична кинетике процесса спекания металлов [10], когда постепенно исчезает пустота и процесс определяется как диффузионная ползучесть под действием сил поверхностного натяжения. Наблюдая за рождением трещин при высыхании белка, мы также можем думать, что процесс отвердевания капли происходит под влиянием температуры с образованием вакансий, пор, дислокаций и, наконец, трещин, дающих в конечном итоге закономерную морфологическую структуру, выявляемую микроскопически.

Мы видим аналогию между получаемой нами при высыхании пленки белка структуры с розеткой спекания в металлах [10]. На этой основе можно думать, что в силу анизотропных свойств, присущих белку, закономерны направления наиболее легкого скольжения дислокаций. Именно в этих направлениях и будут соскальзывать дислокационные петли, и так же, как и при спекании металлов вокруг поры, образуется дислокационный ореол, который является совокуп-

ностью дислокационных упорядоченно расположенных петель, образующих подобие розетки.

Предполагаемая аналогия позволяет думать, что направление движения дислокационных петель предрешает кристаллографическая структура вещества [10]. Такое представление позволяет нам говорить о связи получаемой геометрической фигуры строения «розетки высыхания белка» с его молекулярной структурой. Если это так, то наблюдаемая нами картина кинетики формирования блоков и волн является отражением некоторого самосогласованного процесса. При этом переход к упорядоченности при переходе из жидкости в твердую фазу белка происходит по всей капле или пленке почти одновременно, что свидетельствует о кооперативном характере явления.

Описанные нами постоянно появляющиеся в каждом блоке тонкие розово-голубые волны, идущие с определенной скоростью к центру и образующие «невозбужденные» зоны в форме «ядра» в каждом блоке, с формированием спиральных трещин вокруг невозбужденного центра, с закономерным явлением аннигиляции (погасание энергии) при встрече фронта волн, а также наличие устойчивой и одинаковой амплитуды и скорости волн по всей высыхающей капле белка независимо от начальных условий — все это говорит о том, что перед нами автоволны. Именно такие волны однозначны, так как зависят от активности данной нелинейной среды, описываемой нелинейным уравнением. Только в таких средах две волны при встрече погасают (аннигилируют), как это видно на рис. 6, а—в, в отличие от сред, описываемых линейным уравнением, в которых для распространяющихся в ней волн справедлив принцип суперпозиции, т. е. наложение их амплитуд и связанное с ним явление интерференции. Отсюда вытекает, что автоволновой процесс, появляющийся при фазовом переходе белка из жидкого состояния в твердое, в свою очередь «дорисовывает» микроскопическую картину высыхания белка, начало которой определено дислокациями, причем их направление связано с его кристаллографической решеткой.

Таким образом, можно сказать, что в наших опытах мы имеем налицо все уже установленные признаки самоорганизации и автоволнового процесса, особо интересного в данном случае уже потому, что это касается белка — носителя жизни.

Подчеркнем, что только в отсутствие дополнительных, привнесенных извне реактивов в свободно высыхающей капле белка могут быть заметными и зарегистрированными указанные внутренние глубинные физические свойства, связанные с его молекулярной структурой и активностью данной среды, и потому в этих условиях образуется строго специфичная «розетка высыхания».

Значимость описания этого процесса связана с тем, что внешний облик (морфология высыхающей и высохшей пленки белка) выявляет, вероятнее всего, тот порядок самоорганизации и морфогенеза, который вообще характерен для данной кристаллографической решетки белка, возможно, на всех уровнях организации. Не исключено, что любые фазовые переходы в белке идут через автоволновой процесс. И тогда открытые биофизиками автоволны в живом организме (в мозговой ткани, в сетчатке глаза [3]) можно связать именно с белковым субстратом. С учетом этого возможно, что автоволновые колебания в живом отражают в какой-то степени то, что свойственно физической природе белка в неживом теле.

Поскольку описанная выше кинетика морфологического структурирования белка, ее упорядоченность, периодическая повторяемость во времени и пространстве, являясь специфической, поддаются строгому описанию и анализу, то они положены нами в основу создания метода качественного определения белка в любом биологическом субстрате — жидкости, ткани.

Важно отметить, что указанные закономерности выявляются в капле исследуемого вещества. Это связано с тем, что именно в капле кристаллизация растворенных в ней веществ происходит скачкообразно, периодически [10], вследствие чего и образуются при ее высыхании последовательные концентрические кольца выпавших кристаллов. При этом скопление белка в высохшей капле при его разведении в субстрате происходит именно по наружному периметру, что связано с открытой Релеем [11] замечательной способностью белка

распространяться в тончайшие пленки по поверхности воды. Это и позволило нам предложить способ определения концентрации белка в субстрате, измеряя или сопоставляя радиальный размер наружного периметра высохшей капли с соответствующим эталоном, имеющим указанную выше морфологическую кристаллооптическую картину.

Особенно интересны полученные нами данные о поведении белка на поверхности капли в свете новейших электронно-микроскопических исследований, касающихся образования эластических поверхностных мембран в изолированных микрокапельках цитоплазмы перерезанной клетки [12, 13]. В этих работах перед нами как бы предстает феномен восстановления целостности клетки после ее перерезания, поскольку определенно продемонстрирован и визуализирован эффект самосборки поверхностной мембраны капельки, причем со временем (несколько секунд) она оказывается совершенно аналогичной мембранам содержащихся в ней органоидов и способной в дальнейшем к росту и делению. Однако в данных работах не раскрыта физическая сущность описанного явления. Последняя может быть гораздо глубже понята на основе полученных нами данных, из которых становится ясно, что именно белок, даже неживой, неизбежно оказывается на поверхности капельки, причем высота наружного периметра (зоны скопления белка) или мембраны будет зависеть от концентрации центральной зоны и на периферии капли. А разница в температуре будет определять и процесс фазового перехода белка по наружному периметру капли, его отвердевание с возникновением автоволн, в результате чего формируется эластичная белковая часть мембраны клетки. Это представление, кроме того, соответствует данным [14], согласно которым белок считается главным, составляющим внешней поверхности оболочек растительных клеток.

В заключение отметим, что проведенный опыт с высыхающей каплей белка, по-видимому, представляет определенный общий интерес, так как позволяет изучать эффект самоорганизации, лежащий у истоков биологии. Нам кажется, что этот пример переводит на один язык физико-химическую и биологическую самоорганизацию. Кроме того, возникает вопрос, так ли уж случайно и просто появляется геометрическое сходство блоков и центров и их симметрия в высыхающей пленке белка с клетками и их ядрами в живом мире.

Авторы благодарят М. Я. Амусью и М. И. Клингера за подробное и конструктивное обсуждение работы.

Список литературы

- [1] Гегузин Я. Е. Почему и как исчезает пустота. М.: Наука, 1976.
- [2] Ермаков Н. // Наука и жизнь. 1984. № 9. С. 91—95.
- [3] Заичкин Э. И., Физта Б. А. // Матер. IX Всесоюз. конф. по электронной микроскопии. М., 1973. С. 517.
- [4] Иваницкий Г. Р., Кринский В. И., Сельков Е. Е. Математическая биофизика клетки. М.: Наука, 1978.
- [5] Кринский В. И. // Проблемы кибернетики. 1968. № 20. С. 59—80.
- [6] Кринский В. И., Михайлов А. С. // Автоволны. Сер. Физика. М.: Знание, 1984. № 10. С. 22—29.
- [7] Николис Г., Пригожин Н. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979.
- [8] Полак Л. С., Михайлов А. С. Самоорганизация в неравновесных физических системах. М.: Наука, 1983.
- [9] Рапис Е. Г. // Офтальмологический журнал. 1976. № 2. С. 128—130.
- [10] Рапис Е. Г. // Вестник офтальмологии. 1976. № 4. С. 62—67.
- [11] Салаев Р. Х., Чернышев В. И. // Матер. IX Всесоюз. конф. по электронной микроскопии. М., 1973. С. 515.
- [12] Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980.
- [13] Эбелинг В. Образование структуры при необратимых процессах. М.: Мир, 1973.
- [14] Нейрат Г., Бейли К., Давсон Х., Даниел ДЖ. Т. // Белки. Т. 3. Ч. 1. М.: ИЛ, 1958. С. 220—222.
- [15] Релей А., Нейрат Г., Бейли К. Белки. Т. 3 Ч. 1 М.: ИЛ, 1947. С. 124.

Туркменский научно-исследовательский
институт глазных болезней
Ашхабад

Поступило в Редакцию
29 марта 1989 г.
В окончательной редакции
12 июля 1990 г.