

## Цитоскелет

А. Кашина



Анна Кашина,  
6-й выпуск биокласса  
(Лучшие), школа № 57  
(1982 г.), закончила  
кафедру вирусологии Био-  
фака МГУ (1987 г.), к.б.н.,  
профессор биохимии Пен-  
сильванского университета в  
Филадельфии, США,  
akashina@yahoo.com

Вы, конечно, знаете, что все живые организмы (ну, кроме вирусов) состоят из клеток. А знаете ли вы, что у клеток, как и у людей, есть скелет? Да не один, а целых три.

Три скелетных системы необходимы потому, что цитоскелет (т.е. скелет клетки) выполняет кроме опорной функции массу других и координирует все процессы клеточной жизнедеятельности — движение, взаимодействие клетки с окружающей средой, внутриклеточный транспорт и даже размножение, то есть деление. Эти многообразные функции распределены между тремя типами, или системами цитоскелета (рисунок 1): актиновыми филаментами (красный цвет), микротрубочками (зеленый цвет) и промежуточными филаментами (желтый цвет).

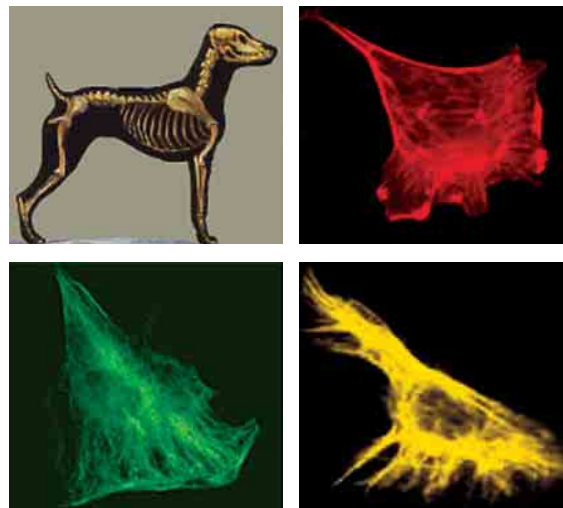
Цитоскелет состоит из системы фибрилл, которые пронизывают цитоплазму во всех направлениях (рисунок 2). На первый взгляд, эти фибриллы расположены беспорядочно. Но на самом деле каждая из систем представляет собой взаимосвязанную динамичную структуру, чье положение в пространстве строго контролируется в каждый момент клеточного цикла. В ответ на внешние сигналы цитоскелет может перестраиваться в течение секунд, обеспечивая быструю реакцию клеток на окружающую среду.

*Актиновые филаменты* в основном отвечают за движение целой клетки, но также принимают участие в других процессах. Их функции варьируют от таких общих процессов, как сокращение мышц (в котором принимают участие много клеток сразу), до таких частных процессов, как движение клеточных органелл на короткие расстояния внутри цитоплазмы. Актиновые филаменты участвуют в прикреплении клеток к субстрату и их движению внутри

тканей, в изменении формы клеток за счет сокращения и выбрасывания отростков, в поддержании динамичной структуры клеток и в образовании перетяжки, которая завершает деление клеток животных.

В мышечных клетках актиновые филаменты образуют миофибриллы — сократимые пучки, которые могут быстро укорачиваться и удлиняться в ответ на сигналы от нервных клеток, и которые позволяют нам двигаться, разговаривать, дышать, ну и вообще существовать. В неммышечных клетках актин тоже образует сократимые пучки, и эти пучки тоже отвечают за движение — но уже не организма, а клетки. Таким образом, актиновый цитоскелет, пожалуй, более правильно сравнивать не с костями животных, а с мышцами. Но так уж повелось, что называют актин скелетом, а не мышечной системой клетки.

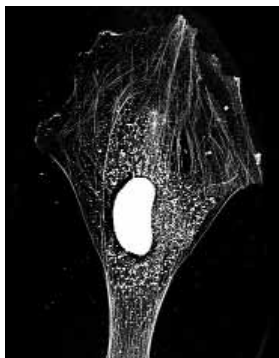
Как нетрудно догадаться по названию, актиновые филаменты состоят из белка актина. Этот белок полимеризуется и образует тонкие фибриллы. Получая сигналы от клетки, эти фибриллы могут быстро собираться и разбираться в разных местах цитоплазмы, обеспечивая быструю реакцию на окружение. Например, если



**Рисунок 1. Три скелетных системы клетки.**

Цитоскелет создает структурную опору клеток и этим немного напоминает скелет животных. Но только у клеток он представлен тремя разными системами фибрилл — актиновыми филаментами (красный цвет), микротрубочками (зеленый цвет) и промежуточными филаментами (желтый цвет).

## Цитоскелет



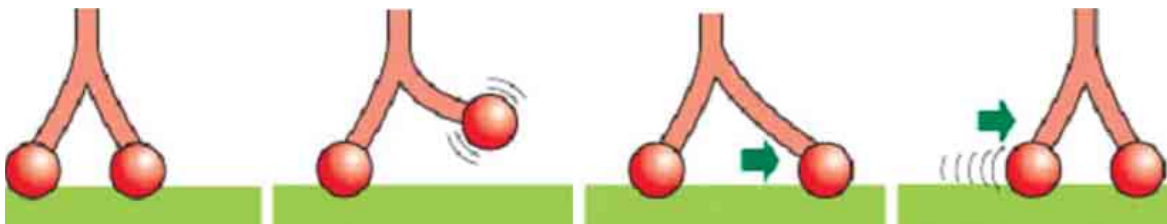
**Рисунок 2. Цитоскелетные фибриллы.**

Если удалить клеточную мембрану, напылить тонким слоем платины оставшиеся структуры и посмотреть на все это в электронный микроскоп, то можно увидеть, что вся цитоплазма пронизана системой цитоскелетных фибрилл.

где-то появилась пища, клетки быстро собирают свои актиновые филаменты и ползут в сторону нового сигнала. А если появился яд — тут уж понятно, надо удирать. В этом случае актин полимеризуется на другом конце клетки, чтобы ползти в противоположную сторону.

Пожалуй, не менее важная и разнообразная по функциям система цитоскелета, чем актин, — это микротрубочки. Они получили свое название потому, что их основной структурный белок тубулин полимеризуется в полые трубообразные тяжи, совсем как маленькие трубочки. В масштабах клетки, кстати, не такие уж маленькие. Из всех трех цитоскелетных систем микротрубочки самые толстые, их диаметр — целых 20 нм (нанометров).

Основная функция микротрубочек — внутриклеточный транспорт. Микротрубочки служат рельсами для всех видов быстрого транспорта органелл и частиц внутри клеток. В интерфазе микротрубочки образуют радиальную сеть, которая расходится от клеточного центра (центросомы) к периферии. По этой сети органеллы и частицы могут ездить по всей цитоплазме до самой плазматической мембраны и обратно до самого ядра. Скорость этого движения около 1 микрометра в секунду, так что за несколько секунд в средней клетке частица может добраться от ядра до края. В митозе микротрубочки быстро перестраиваются и образуют биполярное митотическое веретено — аппарат, который обеспечивает равную сегрегацию (т.е. распределение) хромосом между двумя дочерними клетками.



**Рисунок 3. Моторный белок шагает по цитоскелетным рельсам, преобразуя энергию АТФ в энергию механического движения.**

Если говорить о настоящем эквиваленте клеточного скелета, следует говорить о *промежуточных филаментах*. Эти фибриллы, в разных тканях образованные из белков виментина, десмина или кератина, очень прочные и совсем не такие динамичные как актин. Недавно, однако, было показано, что и эти фибриллы постоянно собираются и разбираются, иногда полностью обновляя свой состав в течение минут.

Промежуточные филаменты — это прочные эластичные тяжи, которые закоривают внутриклеточные структуры и создают защитную оболочку для таких важных органелл как, например, ядро, где хранится вся генетическая информация. Благодаря своей структурной роли эта система цитоскелета — самая пассивная. Даже для того, чтобы распределиться по клетке, промежуточные филаменты используют микротрубочки. Они связываются концами со стенками микротрубочек и скользят по ним, пока не достигнут клеточной периферии. А если микротрубочки разрушить, то промежуточные филаменты просто схлопываются в комок в центре клетки — совсем как натянутая палатка схлопнется, если выдернуть сразу все колышки.

Помимо основных структурных белков — актина, тубулина и виментина-кератина — цитоскелетные системы включают в себя много так называемых ассоциированных белков. Эти белки взаимодействуют с основными цитоскелетными структурами и регулируют их свойства, например способность собираться в пучки, сборку и разборку, взаимодействие друг с другом и с органеллами внутри клетки. Среди ассоциированных белков особую роль играют так называемые *моторные белки*.

Моторные белки обладают уникальным свойством. Они умеют преобразовывать энергию АТФ — универсальной энергетической молекулы в клетках — в механическую энергию движения. В упрощенном виде моторные белки выглядят как палочки на двух ножках (рисунок 3). Каждая ножка — или, как говорят в этой области науки, головка — это моторный центр, который может генерировать «шаг» в процессе гидролиза одной молекулы АТФ. Моторные «ножки» гидролизуют

АТФ по очереди. Пока одна из них гидролизует и делает шаг, вторая стоит на месте. В целом получается точно как ходьба — молекула мотора идет, переставляя по очереди одну ногу за другой. А на «спине» своей мотор несет груз — внутриклеточную частицу или органеллу. Так осуществляются все формы активного внутриклеточного транспорта органелл и крупных частиц — от транспорта пигментных пузырьков в процессе смены окраски у рыб до транспорта хромосом в митозе.

Моторные белки очень специфичны. Каждый из них переносит только определенный тип органелл или частиц. Каждый из них строго специфичен к своей фазе клеточного цикла — в интерфазе моторов немного, а в митозе, когда все усилия брошены на быстроту и точ-

ность в распределении генетического материала, действует не менее десятка разных моторов. Но главное различие моторов — в типе внутриклеточных «рельс», которые они используют для транспорта. Два основных типа моторов — кинезин и динеин — движутся только по микротрубочкам, причем кинезин всегда шагает в направлении края клетки, а динеин движется к центру. Третий мотор — миозин — движется только по актину. Разные типы миозина принимают участие в сокращении мышц и немышечных актиновых пучков, в движении органелл в цитоплазме и в образовании перетяжки при делении клеток. Конечно, этим не ограничиваются функции этих трех моторов, да и разнообразие у них — будь здоров. Но это уже совсем другая история.