

к сократительным белкам жгутиков и ресничек, приведены в монографии Поглазова [180].

Очень важно, конечно, что установлены определенные черты сходства между движением жгутиков и мышечным сокращением. Различные типы внутренней и внешней регуляции движения еще не изучены, и изложенные в этом параграфе теоретические модели и представления имеют феноменологический характер.

§ 5.12. ДРУГИЕ МЕХАНОХИМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

В заключение настоящей главы кратко рассмотрим некоторые другие биологические механохимические системы.

Двигательный аппарат «хвостатых» бактериофагов локализован в хвостовом чехле, который представляет собой сократительную структуру. При адсорбции фага Т2 на бактериальной клетке хвостовой чехол укорачивается в два раза и расширяется на 30% [181]. Установлены АТФ-азные свойства хвостовых структур этого фага, а также ряда других фагов [182]. Несомненные конформационные превращения в таких структурах, ответственные за сокращение. Дальнейшие подробности содержатся в монографии Поглазова [180].

Движение листьев растений (в частности мимозы, *Mimosa pudica*) также связано с АТФ-азной активностью содержащихся в них сократительных белков (см. [183], а также [180]).

Значительный интерес для физики представляет движение протоплазмы — универсальный процесс, фигурирующий в самых разнообразных клетках. Подробное его рассмотрение было дано в свое время в монографии Камия [184]. Ограничимся здесь лишь немногими фактами (ср. [30, 55]).

В случае движения протоплазмы в клетке водоросли *Nitella* сдвиговая сила генерируется на границе геля и золя. Наблюдается скольжение волокнистых структур относительно окружающего золя. В амебах были обнаружены пучки тонких нитей, выделены актиноподобный [185, 186] и миозиноподобный [187] белки. Почти наверное можно считать, что за движение протоплазмы ответственна система актомиозин — АТФ [30, 55].

Плазмодий миксомицетов выполняет активные колебательные движения протоплазмы [184]. Его белки хорошо охарактеризованы. Плазмодий содержит актин и миозин, весьма сходные с мышечными. Миозин плазмодия, однако, не образует толстых нитей, но лишь малые олигомеры. Тем не менее, этот миозин взаимодействует с актином плазмодия. В плазмодии обнаружены тонкие пучки нитей, построенные из актина и миозина. Эти пучки появляются и исчезают, следуя за фазами колебаний [188]. Ток протоплазмы регулируется ионами Ca^{++} , по-видимому, с участием еще не известных регуляторных белков [189]. Можно

думать о сходстве движения протоплазмы с мышечным, однако отсутствие толстых нитей означает отсутствие тождества. Эти явления во всех их аспектах изучены еще недостаточно. Движения описанного типа, а также многие другие (например, движения пластинок в крови, испытывающих своего рода сокращения при образовании сгустков) определяются взаимодействием актиноподобного и миозиноподобного белков, в общем сходным с наблюдаемым в мышце. Результатом их взаимодействия является гидролиз АТФ, энергия которой используется для движения. Можно думать, что взаимодействие актина с головками миозина возникло в качестве механизма движения на очень ранней стадии эволюции и клетки использовали этот механизм постоянно, сохраняя его важнейшие особенности [30] (см. также [217]).

При делении клеток, при митозе и мейозе происходят механические движения — перемещения протоплазмы и хромосом. Детальные цитологические исследования митоза проведены Мэзия ([191, 192], см. также [193]). Митотический аппарат клетки состоит из видимых под микроскопом тяжей, соединяющих друг с другом центриоли и хромосомы с центриолями. Отметим попутно, что центриоли имеют структуру «9 + 2», подобную структуре жгутиков и ресничек. Показано, что жгутики сперматозоидов вырастают именно из центриолей и кинетохоров хромосом.

Белок митотического аппарата сходен с актином. Такой белок выделен из митотического [194] и мейотического [195] веретен некоторых насекомых. Добавление АТФ вызывает медленное удлинение митотического аппарата. Пока не ясна непосредственная связь митотических движений с АТФ-азной активностью, и механизм работы митотического аппарата загадочен. Естественно искать объяснение механических явлений при митозе, исходя из общих принципов, установленных для других биологических механохимических систем.

В мембранах митохондрий — органоидов клеток, в которых локализован основной биоэнергетический процесс окислительного фосфорилирования, — сократительные процессы сопряжены с активным транспортом и с цепями химических реакций (см. гл. 6).

Есть все основания думать, что *механорецепция*, а также *акустическая рецепция* связаны с механохимическими процессами.

Одиночный механорецептор — *тельце Пачини* — изображен схематически на рис. 5.34. В состав рецептора входит нервное окончание, окруженное капсулой, состоящей из периферической и центральной зон. Периферическая зона состоит примерно из 30 замкнутых упругих оболочек. Центральная зона (внутренняя колба) содержит около 60 плотно уложенных цитоплазматических слоев, разделенных «щелью», ориентированной вдоль длин-

ной оси эллиптического сечения нервного окончания [196—198]. Модуль упругости оболочек периферической зоны составляет около 10^6 Г/см², оболочки способны реагировать на механическую силу в диапазоне 150—200 дин [199].

Тельца Пачини преобразуют механическое воздействие в первые импульсы. В этом смысле их функция противоположна функции мышцы. В работе [200] изучались характеристики этих преобразователей путем бесконтактной стимуляции гармоническими звуковыми колебаниями в диапазоне частот 60—600 Гц.

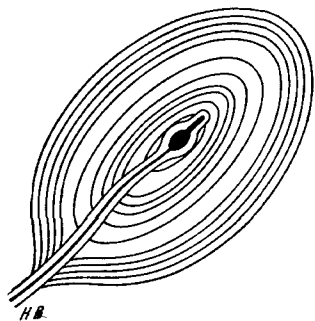


Рис. 5.34. Схема тельца Пачини.

на — нервное волокно.

Максимальная чувствительность регистрируется для частоты 100—200 Гц, оптимальная частота следования потенциала действия совпадает с этим значением. Реализуется своего рода биомеханический резонанс [201]. Собственный период возбуждения рецептора составляет 9,6 мс, что соответствует той же периодичности раздражений порядка 100 Гц [202].

В работе [200] высказано предположение о том, что регулирование проницаемости плазматической мембраны нервного окончания связано с участием сократительных белков. В результате электронно-микроскопических и гистохимических исследований установлено, что активный участок нервного окончания в области «щели» играет доминирующую роль в возникновении возбуждения. Показано, что в этой области происходит расщепление АТФ. Можно думать, что мембрана содержит ориентированные молекулы белка, обладающие АТФ-азной активностью. Механический стимул вызывает конформационные изменения в этих молекулах и в соответствии с положением, сформулированным в [151] (см. стр. 270), изменения их АТФ-азной активности. Энергия, выделяемая при расщеплении АТФ, расходуется на работу натриевого насоса (см. стр. 116).

Эта интересная работа выдвигает ряд проблем, требующих дальнейших исследований. Белки, действующие в тельцах Пачини, пока не охарактеризованы. Было бы очень важно установить черты их сходства с актином и миозином. Те же идеи, по-видимому, могут оказаться существенными для понимания акустической рецепции (см. также [219]).

Сократительные белки, прежде всего актин, фигурируют и в ряде других клеток и тканей. Показано, что актин составляет около 20% всего белка в нейронах цыпленка [203]. В этой же работе указывается на присутствие актина или актиноподобного

белка в эмбриональной линзе, легких, коже, сердце, поджелудочной железе, почках и в мозговой ткани цыпленка. Актиноподобные и миозиноподобные белки выделены из тромбоцитенна, из комплекса сократительных белков в тромбоцитах человека [204].

Приведенные выше факты подтверждают общее положение о необходимости механического движения в жизненных процессах и о сходстве механизмов этого движения в самых разнообразных биологических системах.

Можно считать установленными общие принципы биологической механохимии. Конкретные модели детально разработаны для поперечно-полосатой мышцы, для жгутиков и ресничек. Как уже сказано, это еще далеко не означает решения соответствующих проблем. В большинстве других случаев такие модели пока отсутствуют. Задачи дальнейшего исследования механических движений внутриклеточных органелл, клеток, тканей и организмов, раскрытие молекулярных, электронно-конформационных процессов, ответственных за эти движения, очень актуальны.