

УДК 577.3

БИОФИЗИКА

Л. Л. РАЗУМОВА, А. А. ВЕРЕТЕННИКОВА, С. В. АНДРЕЕВ, Л. М. ЧЕЛНОВА

РЕНТГЕНДИФРАКЦИОННОЕ ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЫ

(Представлено академиком Г. М. Франком 4 II 1971)

Сердечная мышца человека и животных по сравнению с их скелетными мышцами отличается высокой периодической сократительной активностью, особенностями метаболизма — высокой интенсивностью процессов фосфорилирования, окисления, концентрацией цитохромов, уровнем биосинтеза белков и НАД, а также своей структурой (^{1, 2}). При различных патологических процессах нарушаются и обменные процессы и структурная организация миокарда (^{3, 4}). Например, при явлениях декомпенсации при острой и при хронической сердечной недостаточности

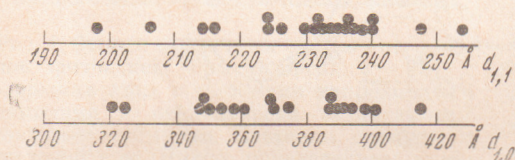


Рис. 1. Периоды решетки ($d_{1,0}$ и $d_{1,1}$) протофибрилл саркомера здоровой сердечной мышцы человека. Образцы приготовлены путем фиксации 10% раствором формалина (рН 7,3) закрепленных для сохранения длины пучков волокон миокарда

уменьшается содержание актомиозина и саркоплазматических белков, изменяется ультраструктура миокарда человека (^{5, 6}). Для полноты изучения функциональных особенностей и метаболизма сердца нами было предпринято рентгенодифракционное исследование сердечной мышцы человека и собаки.

Образцы брали из правого и левого желудочков сердечной мышцы и из митрального клапана; фиксацию формалином проводили при некотором его натяжении.

Обнаружено, что сердечная мышца дает малоугловые рентгенограммы экваториальные (РМУэ) с двумя дифракционными максимумами: (1,0) и (1,1), подобно тому, как наблюдается на РМУэ скелетных поперечнополосатых мышц (^{7, 8}). Это свидетельствует о том, что и в сердечной мышце имеется регулярная боковая упаковка актин- и миозинсодержащих протофибрилл саркомера. Периоды решетки протофибрилл саркомера сердечной мышцы в норме варьируют от образца к образцу довольно значительно (рис. 1). Эти различия периодов решетки протофибрилл не зависят от возраста, они могут быть связаны как с неодинаковостью длины, задаваемой образцам при фиксации, по отношению к длине покоя, так и с особенностями метаболизма данных образцов. Как видно из рис. 1 и данных табл. 1, для сердечной мышцы человека для периода (1,0) (т. е. для периода упаковки миозиновых протофибрилл в Н-зоне саркомера) наблюдался разброс величин $d_{1,0}$ от 320 до 415 Å, причем интервал преимущественных значений был от ~ 350 до 400 Å; для периода (1,1) (т. е. для периода упаковки протофибрилл в зоне совмещения актиновых и миозиновых нитей) разброс величин — от 200 до 250 Å, с интервалом преимущественных значений $d_{1,1}$ в области от 230 до 240 Å. Приблизительно в том же интервале находятся значения $d_{1,0}$ и $d_{1,1}$ для сердечных

мышц собак. Величины периодов решетки протофибрилл (1,0) и (1,1) того же порядка ранее наблюдали (⁷⁻⁹) для скелетных мышц позвоночных.

Специфической особенностью РМУэ сердечной мышцы в норме является малая интенсивность рефлекса (1,0) по сравнению с интенсивностью рефлекса (1,1) $I_{1,0}/I_{1,1}$. Тогда как для образцов скелетных мышц, фиксированных формалином, $I_{1,0}/I_{1,1}$ порядка 2—4 (⁸), для сердечной мышцы

Таблица 1

Получаемые из РМУ характеристики решетки белковых протофибрилл саркомера некоторых образцов сердечной мышцы

Образец	Периоды решетки, Å		$I_{1,0}/I_{1,1}$	Характер рефлексов
	$d_{1,0}$	$d_{1,1}$		
Сердце человека				
Возраст 3 часа				
левый желудочек	381	242	0,7	оч. диффузн.
правый »	391	238	0,4	диффузные
37 лет				
левый »	400	238	0,5	среднедиффузн.
правый »	374	234	0,5	диффузные
55 лет				
левый »	317	205	0,3	четкие
правый »	354	222	0,7	»
митральный клапан	350	215	0,4	»
57 лет, с зарубцевавшимся инфарктом миокарда				
левый желудочек	415	233	0,8	диффузные
правый »	386	236	0,5	»
Сердечная мышца из участка, удаляемого во время операции по поводу тетрады Фалло				Без рефлексов
Сердце собаки				
Здоровое				
Вариант I, левый желудочек	379	224	0,8	
Вариант II, левый »	405	231	1,3	
» (правый »	442	258	1,3	
Кардиальный шок				
[левый желудочек]	382	218	0,3	
правый »	374	215	1,0	
Экспериментальная сердечно-сосудистая недостаточность				
Вариант I, левый желудочек	389	221	2,2	
» правый »	390	227	1,5	
Вариант II, левый »				Без рефлексов
» правый »	357	212	0,6	
Скелетная мышца человека (большая грудная мышца), pH 7,0	378	228	2,5	
Пор্তняжная мышца лягушки, длина покоя (°)	360	205	4,0	

эта величина около 0,5—0,6. Соотношение интенсивностей рефлексов (1,0) и (1,1) отражает соответственно соотношение протяженностей Н-зоны и зоны совмещения двух наборов белковых протофибрилл саркомера; малая величина $I_{1,0}/I_{1,1}$ для сердечной мышцы согласуется с данными электронномикроскопических наблюдений о малой длине Н-зоны саркомеров сердечной мышцы (¹⁰).

В нескольких образцах как в норме, так и в патологии мы наблюдали заметное отклонение величины $I_{1,0}/I_{1,1}$ от указанной, а именно — уве-

личение $I_{1,0}/I_{1,1}$ до 2,0 и несколько более (см. табл. 1). Увеличение $I_{1,0}/I_{1,1}$ свидетельствует об изменении соотношения протяженностей Н-зоны и зоны совмещения двух наборов протофибрилл, а именно, об относительном удлинении Н-зоны, относительном укорочении зоны совмещения наборов протофибрилл. Если увеличение $I_{1,0}/I_{1,1}$ имеет место при увеличении или при сохранении величины периодов $d_{1,0}$ и $d_{1,1}$, при уменьшении или сохранении длины образца, то оно связано с подсокращением протофибрилл того или другого набора. В частности, соответствующую совокупность изменений решетки протофибрилл наблюдали при укорочении мышц, обладающих некоторыми особенностями, например — летательных мышц насекомых⁽¹²⁾, истощенных мышц лягушки⁽¹¹⁾. Для сердечной мышцы причиной замеченного феномена увеличения отношения $I_{1,0}/I_{1,1}$ при сохранении или увеличении значений периодов решетки протофибрилл могут быть как ее специфические функциональные особенности, ее повышенная реактивность, так и какие-либо отклонения от нормы.

Ни для одного из образцов сердечной мышцы нам не удалось получить меридиональные малоугловые рентгенограммы (РМУм), которые дают сведения об особенностях макромолекулярного строения мышц в направлении оси их волокон. Это показывает, что несмотря на то, что длина мышц при фиксации не могла заметно изменяться (мышцы были привязаны), образцы оказались зафиксированными не в состоянии покоя, видимо, вследствие их повышенной по сравнению со скелетными мышцами реактивности.

Для сердечных мышц человека и собаки с нарушениями сердечной деятельности наблюдали РМУэ трех типов: 1) неизменные или мало измененные по сравнению с нормой (норма — РМУэ с $I_{1,0}/I_{1,1} < 1$, точнее, около 0,4—0,7, как наиболее коррелирующие с электронномикроскопическими наблюдениями⁽¹⁰⁾ и не указывающие на подсокращение протофибрилл); 2) с соотношением $I_{1,0}/I_{1,1} > 1$; 3) без дискретных рефлексов (табл. 1).

Известно, что отсутствие дискретных рефлексов на РМУэ указывает на отсутствие регулярности во взаимном расположении (в боковой упаковке) протофибрилл саркомера, на нарушение решетки протофибрилл. Такие РМУэ получают от гладких мышц, где расстояния между протофибриллами нерегулярны; они могут быть получены от таких сверхсокращенных или деградирующих поперечно-полосатых мышц, где отсутствует регулярность решетки протофибрилл. Для сердечных мышц мы получили РМУэ без рефлексов для образцов из участка, удаляемого при операциях тетрады Фалло у детей, — для образцов мышечной ткани выходного отверстия правого желудочка. Кроме того, РМУэ без рефлексов наблюдали на некоторых образцах мышечной ткани сердца собаки, у которой путем резекции определенной части створки митрального клапана, т. е. в случае моделирования сердечно-сосудистой недостаточности, были созданы условия кислородного дефицита в сердечной мышце.

Как уже упомянуто, характеристики РМУэ больного сердца в отдельных случаях лежали в пределах, наблюдаемых для нормы, например для сердечной мышцы человека со старым инфарктом миокарда, погибшего от других причин; для сердечной мышцы некоторых собак с нарушениями сердечной деятельности. Очевидно, поскольку изменения характеристик протофибрилярного контрактильного аппарата сердечной мышцы здесь по РМУэ не регистрируются, в этих случаях изменения в сердечной мышце менее глубоки, чем в случаях, давших РМУэ без рефлексов. С точки зрения рентгендифракционных характеристик мы наблюдали существенные изменения в структуре сердечной мышцы — на участках, удаленных при операциях тетрады Фалло.

Рентгендифракционные исследования, дающие некоторые характеристики решетки белковых протофибрилл саркомеров сердечной мышцы,

вносят определенную информацию в комплексное исследование особенностей сердечной мышцы в норме и в патологии.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступило
25 I 1971

Институт сердечно-сосудистой хирургии
Академии медицинских наук СССР
Москва

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ A. Bernsmeier, W. Rudolph, Verh. Dtsch. Ges. Kreis. Forsch., 27, 559 (1961).
² D. E. Green, R. F. Goldberger, Am. J. Med., 30, 666 (1961). ³ H. Messen, Am. J. Card., 22, 319 (1968). ⁴ А. Нови, Кардиология, 2, 20 (1969). ⁵ Н. Карсанов, Сократительные и саркоплазменные белки миокарда при недостаточности сердца и у практически здоровых людей, Тбилиси, 1963. ⁶ С. В. Андреев, Е. Степанян и др., Матер. I. Всесоюзн. съезда патофизиологов, Баку, 1970, стр. 200. ⁷ H. E. Huxley, Proc. Roy. Soc., B 141, 59 (1953). ⁸ Л. Л. Разумова, Б. К. Лемажухин и др., ДАН, 157, 688 (1964). ⁹ J. Hanson, Quarterly Rev. Biophys., 1, 177 (1968). ¹⁰ В. В. Глаголева, Ю. С. Чечулин, Ультраструктурные основы нарушения функции сердечной мышцы (атлас), М., 1968. ¹¹ Л. Л. Разумова, Л. А. Мельников, Б. К. Лемажухин, Сборн. Биофизика мышечного сокращения, 1966, стр. 77. ¹² Л. Л. Разумова, К. А. Янчук и др., Биофизика, 11, 818 (1966).