
ДИСКУСІЇ

DOI 10.29254/2077-4214-2018-1-2-143-9-11

УДК 611.12:611.018:611.01

Загоруйко Г. Е., Загоруйко Ю. В.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ СОКРАТИТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПОСТМИТОТИЧЕСКИХ КАРДИОМИОЦИТОВ

Харьковский национальный медицинский университет (г. Харьков)

Prof.zagoruykoGE@gmail.com

Проведенные в 60-х годах XX века электронномикроскопические исследования строения скелетной мышечной ткани млекопитающих, позволили теоретически обосновать и предложить схему структурной организации мышечного волокна (МВ) [1,2]. В состав МВ входит множество нитевидных элементов – **миофибрилл (Мф)** в количестве 1-2 тыс и диаметром 0,5 – 2 мкм. Длина Мф равна длине мышечного волокна. Сократительный аппарат (СА) МВ сформированный множеством Мф обеспечивает их сокращение ↔ расслабление. В состав Мф входят однотипные последовательно расположенные структурные элементы – **саркомеры**. Форму саркомеров Мф аппроксимируют прямым круговым цилиндром диаметром 0,5 – 2 мкм и высотой (длина саркомера) 2 – 2,5 мкм. Саркомеры соседних Мф в МВ расположены друга против друга, отчего МВ имеет периодическую правильную исчерченность [1,2].

Строение сердечной мышечной ткани отличается от скелетной. Она состоит из множества клеток – кардиомиоцитов (КМЦ). С помощью вставочных дисков (ВД) КМЦ соединяются друг с другом и формируют разветвленные МВ в составе миокарда желудочков. На гистологических и электронномикроскопических препаратах миокарда выявляется четко выраженная поперечная исчерченность КМЦ. Это послужило основанием предположить, что строение СА КМЦ принципиально не отличается от строения СА МВ скелетной мышечной ткани [1,2]. СА КМЦ также состоит из множества Мф, поперечная исчерченность которых, обусловлена наличием в Мф саркомеров.

В последние годы внимание морфологов привлекают проблемы миофибриллогенеза и закономерности развития СА КМЦ в процессе онтогенеза человека, лабораторных животных [3,4]. Однако, многие аспекты развития СА КМЦ еще мало исследованы, а трактовка результатов – спорная. Оказалось, что изображения **поперечных** сечений СА КМЦ не «вписываются» в модель строения СА скелетной мышечной ткани. Отсутствуют объективные морфологические критерии, которые позволяют на продольных, косых и, особенно, **поперечных** срезах КМЦ четко определить «границы» отдельных Мф и саркомеров как объемных, трехмерных элементов СА КМЦ. На **поперечных** срезах миокарда СА КМЦ состоит из множества тонких и толстых филаментов, которые **равномерно** без

выраженных границ заполняют промежутки между срезами многочисленных митохондрий (Мт). Довольно часто между сечениями Мт и СА выявляются оптически светлые полости разной величины. Полости заполнены гиалоплазмой, элементами синтетического аппарата, гранулами гликогена, липидными включениями. И только на **продольных** срезах миокарда в КМЦ определяются параллельно расположенные **сечения** Мф, в составе которых выявляются различной величины многочисленные саркомеры. Размеры контуров сечений этих саркомеров широко варьируют от 0,2 до 4-6 мкм (длина Z линий саркомеров) [5, рис. 31]. Следует отметить, что диаметр сечений КМЦ половозрелых молодых крыс линии Вистар не превышает значений 12 – 16 мкм. Трудно представить, что в составе КМЦ животных одновременно находятся Мф с минимальным диаметром 0,2 мкм и максимальным 4-6 мкм (1/2 – 1/3 диаметра КМЦ). В литературе, посвященной исследованию динамики структурной организации КМЦ животных в процессе онтогенеза, в условиях моделирования патологии сердечно-сосудистой системы, отсутствуют морфометрические данные о размерах саркомеров, Мф, их протяженности и количестве в составе СА КМЦ желудочков и предсердий [6,7]. В этих работах приведены результаты определения относительного объема и удельной площади поверхности Мф в КМЦ. Некоторые исследователи считают, что отсутствие «границ» между Мф в КМЦ обусловлено «...частичным слиянием Мф друг с другом в единую систему» [1]. Однако, для подтверждения возможности «слияния ↔ расщепления» Мф КМЦ необходимо провести специальные исследования с привлечением методов просвечивающей и растровой электронной микроскопии, реконструкции и математического моделирования.

Данные литературы и собственные электронномикроскопические исследования вызывают сомнения в соответствии классической модели СА МВ скелетной мышечной ткани в приложении к СА КМЦ млекопитающих. Вследствие отсутствия на поперечных срезах КМЦ четких границ между Мф, считаем, что термин «миофибрилла» не применим к описанию пространственной структурной организации СА КМЦ. Особенности строения поперечных сечений КМЦ позволили нам предложить более приемлемую **геометрическую модель** СА КМЦ. Такой моделью, по нашим данным,

является **комплекс** последовательно расположенных **дисков**, образованных множеством филаментов актина и миозина. Диаметр этих дисков соответствует диаметру сечений КМЦ, а ширина – расстоянию между телофрагмами. Располагаются диски поперек продольной оси КМЦ, прилежат друг к другу и соединены между собой телофрагмами. Для названия контрактильного **диска** – структурной единицы СА КМЦ, предлагаем использовать термин **саркосома**. Термином «саркосома» обозначали энергопродуцирующую органеллу клеток, образующих летательную мускулатуру насекомых [8]. Термин саркосома используют в названии съедобного гриба «Саркосома шаровидная» (*Sarcosoma globosum*) [9]. Модель саркосомы КМЦ представляет собой **низкий цилиндр**, диаметр основания которого равен диаметру поперечного сечения КМЦ (d , мкм), а высота – длине саркомера l , мкм. На гисто- и ультратонких препаратах КМЦ участки срезов саркосом представлены **саркомерами**. Но, в отличие от саркомеров МВ скелетной мышечной ткани, саркомеры СА КМЦ представляют собой тонкие **плоские сечения саркосом**. Вариабельность размеров саркомеров определяется длиной Z- линии и зависит от расстояния конкретного среза до центра саркосомы. Min размер саркомеров наблюдается в срезах, которые прошли через край саркосомы, тах – через центр саркосомы. **Структурным элементом** саркосомы является элементарный **комплекс**, состоящий из **миозинового** филамента, окруженного шестью тонкими актиновыми филаментами. Концы актиновых филаментов крепятся к **Z – тельцам**. Исходя из выше изложенного, **сократительный аппарат КМЦ** состоит из **саркосом**, которые расположены поперек продольной оси КМЦ, плотно прилежат друг к другу и соединены между собой Z- дисками (телофрагмами). Площадь основания саркосомы равна площади телофрагмы и площади поперечного сечения КМЦ. Телофрагма саркосом состоит из множества сложно переплетенных белковых нитей, является опорным элементом тонких филаментов и крепится к внутренней поверхности сарколеммы КМЦ. Следовательно, саркосомы связаны между собой и относительно прочно прикреплены к сарколемме КМЦ. Однородные по строению саркосомы СА КМЦ **пронизаны** множеством разнообразных по форме и размерам **полостей** (щели, канальца, поры и т.п.), внутри которых циркулирует саркоплазма и локализованы ядро, органеллы и включения. Полости в саркосомах связаны между собой, контактируют с сарколеммой и формируют в объеме КМЦ трехмерную сложноорганизованную пористую структуру. В зависимости от формы, размеров, расположения и количества полостей, определяются три вида саркосом. **Торцевые**. Они контактируют с ВД и имеют мало полостей. **Центральные**. Содержат наибольшую по размерам полость, в которой расположено ядро, синтетический аппарат,

множество округлой формы Мх и включений. **Промежуточные**. В продольных полостях этих саркосом расположены удлиненной формы митохондрии и многочисленные включения (гранулы гликогена, липидные капли) (**рис.**).

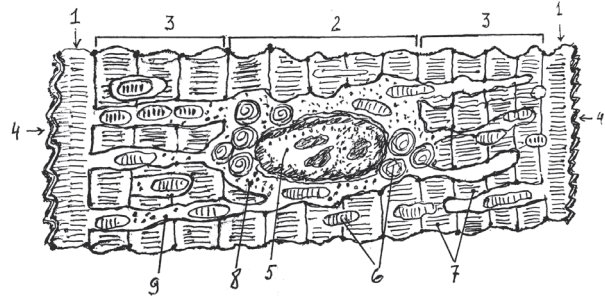


Рис. Схема продольного среза кардиомиоцита: 1 – торцевые; 2 – центральные; 3 – промежуточные саркосомы; 4 – вставочный диск; 5 – ядро; 6 – митохондрии; 7 – трабекулы саркосом; 8 – околоядерная полость; 9 – продольная полость.

В процессе постнатального развития млекопитающих число саркосом, их размеры, характер распределения в них пор и полостей изменяются соответственно с ростом размеров КМЦ. Пористое строение саркосом способствует образованию и формированию внутри СА КМЦ множества различной формы и размеров взаимосвязанных **трабекул** – пластинок, перегородок и т.п. состоящих из контрактильных элементов: тонких и толстых филаментов. Трабекуляция СА обеспечивает деформируемость, пластичность, сложнейшую биомеханику и широкие адаптационные возможности КМЦ. В **таблице** приведены данные сравнения структурной организации СА МВ скелетной мышечной ткани и СА КМЦ.

Трабекулы и межтрабекулярные пространства в КМЦ относятся к важным, но практически не исследованным структурным компонентам. Образование трабекул является общим для всех позвоночных этапов кардиомиогенеза [10]. СА является доминирующим структурно-функциональным компонентом КМЦ млекопитающих. По нашим данным, относительный объем СА в КМЦ левого желудочка сердца крыс линии

Таблица.

Сравнительный анализ структурной организации СА МВ и КМЦ

Структурный элемент	Характеристика структурного элемента
СА МВ скелетной мышечной ткани	
СА мышечных волокон	Множество миофибрилл
Миофибрилла	Структурный элемент СА МВ. Сократимая структура нитевидной формы состоящая из множества саркомеров
Саркомер	Структурный элемент миофибриллы в форме прямого кругового цилиндра диаметром 0,5 – 2 мкм и высотой 2-3 мкм.
СА КМЦ миокарда желудочков сердца	
СА кардиомиоцитов	Множество саркосом
Саркосома	Структурный элемент СА КМЦ. Сократимая трехмерная структура в форме диска , диаметр площади основания которого равен диаметру поперечного сечения КМЦ (d , мкм), а высота – длине саркомера l , мкм
Саркомер	Плоское (двухмерное) сечение саркосомы

Вистар увеличивается от 33,50 % у новорожденных до 40 % в возрасте 45 суток и составляет 50 % в КМЦ 3-х мес крыс [11]. Наличие многочисленных полостей и

каналцев в объеме саркосом, позволяет исследовать их свойства с привлечением методов не только морфометрии и стереологии, но и порометрии [12].

Литература

1. Bykov VL. Tsitologiya i obshchaya gistologiya (funktsionalnaya morfologiya kletok i tkaney cheloveka). SPb.: SOTIS; 1999. 520 s. [in Russian].
2. Rukovodstvo po gistologii. SPb.: SpetsLit; 2001. 495 s. [in Russian].
3. Marchenko DG. Tverdokhlіb ІV. Ontogenetichnі mekhanizmi formuvannya skorotlivogo aparata kardiomiotsitіv. Morfologiya. 2012;6(4):5-11. [in Ukrainian].
4. Shevchenko KM. Morfolоgіchnі zmnі skorotlivogo aparata kardiomiotsitіv peredserd shchuriv v normі ta za umov vplivu gostroі khronіchnoі prenatalnoі gіpoksії. Rol a-gladkomyazovogo aktinu u miofibrilogenezi. Morfologiya. 2016;10(2):85-92. [in Ukrainian].
5. Volkov KS, Pasēchko NV. Ul'trastruktura klіtin і tkanin (navchalniy posіbnik). Ternopіl: Ukrmedkniga; 1997. 96 s. [in Ukrainian].
6. Nepomnyashchikh LM, Lushnikova YeL, Nepomnyashchikh GI. Morfometriya i stereologiya gipertrofii serdtsa. Novosibirsk: Nauka; 1986. 304 s. [in Russian].
7. Nepomnyashchikh LM. Patologicheskaya anatomiya i ultrastruktura serdtsa (Kompleksnoye morfologicheskoye issledovaniye obshchepatologicheskogo protsessа v miokarde). Novosibirsk: Nauka; 1981. 324 s. [in Russian].
8. Arefyev VA, Lisovenko LA. Anglo-russkiy slovar geneticheskikh terminov. M.: VNIRO; 1995. 407 s. [in Russian].
9. Matantsev AN, Matantseva SG. Griby. Spravochnik-opredelitel. M.: Feniks; 2014. 248 s. [in Russian].
10. Mashtalir MA, Moroz NA, Pototskaya OYu, Shapoval YeA. Ranniyaya trabekulyatsiya zheludochkovogo otdela embrionalnogo serdtsa. Mat. 11 Vseukr. nauch. morf. konf. Karpovskі chitannya. Dniproperetrovsk: Porogi; 2005. s. 43-5. [in Russian].
11. Zagoruyko GYe, Zagoruyko YuV. Morfometricheskii analiz prenatalnogo i postnatalnogo sozrevaniya kardiomiotsitov kryс. Vіsник. probl. biol. і meditsini. 2017;2(136):290-4. [in Russian].
12. Plachenov TG, Kolosentsev SD. Porometriya. L.: Khimiya; 1988. 176 s. [in Russian].

ГЕОМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ ПРОСТОРОВОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ СКОРОТЛИВОГО АПАРАТУ ПОСТМІТОТИЧНИХ КАРДІОМІОЦИТІВ

Загоруйко Г. Е., Загоруйко Ю. В.

Резюме. Виходячи з аналізу зображень випадково орієнтованих зрізів КМЦ, найбільш прийнятною геометричною моделлю скоротливого апарату (СА) КМЦ є комплекс послідовно розташованих дисків, що складаються з безлічі філаментів актину і міозину. Діаметр дисків відповідає діаметру перетину КМЦ, а ширина – відстані між телофрагмами. Розташовуються диски поперек поздовжньої вісі КМЦ, щільно прилягають один до одного і з'єднані Z – смужками. Для назви диска – структурної одиниці СА КМЦ, пропонуємо використовувати термін «саркосома». Модель саркосоми КМЦ – низький циліндр, діаметр якого дорівнює діаметру поперечного перерізу КМЦ (d , мкм), а висота – довжині саркомера l , мкм.

Ключові слова: кардіоміоцит, скоротливий апарат (СА) КМЦ, саркосома, геометрична модель СА КМЦ.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ СОКРАТИТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПОСТМИТОТИЧЕСКИХ КАРДИОМИОЦИТОВ

Загоруйко Г. Е., Загоруйко Ю. В.

Резюме. Исходя из анализа изображений случайно ориентированных срезов КМЦ, наиболее приемлемой геометрической моделью сократительного аппарата (СА) КМЦ является комплекс последовательно расположенных дисков, которые состоят из множества филаментов актина и миозина. Диаметр дисков соответствует диаметру сечения КМЦ, а ширина – расстоянию между телофрагмами. Располагаются диски поперек продольной оси КМЦ, плотно прилегают друг к другу и соединены между собой телофрагмами. Для названия диска – структурной единицы СА КМЦ, предлагаем использовать термин «саркосома». Модель саркосомы КМЦ – низкий цилиндр, диаметр основания которого равен диаметру поперечного сечения КМЦ (d , мкм), а высота – длине саркомера l , мкм (расстоянию между двумя Z линиями).

Ключевые слова: кардиомиоцит, сократительный аппарат (СА) КМЦ, саркосома, геометрическая модель СА КМЦ.

GEOMETRIC MODEL OF SPATIAL ORGANIZATION OF A COMPLEX DEVICE FOR POSTMITOTIC CARDIOMIOCYTES

Zagoruiko G. E., Zagoruyko Yu. V.

Abstract. Due to the absence of clearly defined boundaries between MFs on the transverse sections of CMC, we believe that the term “myofibril” is not applicable for characterizing the structural organization of the contractile apparatus (CA) of CMC. The geometric model of CA CMC is a complex of sequentially located disks, which consist of a set of filaments of actin and myosin. The diameter of the disk corresponds to the diameter of the CMC section, and the width to the distance between the telophragms. Disks are disposed across the longitudinal axis of the CMC, closely adjacent to each other and connected to each other by telophragms. The disk is a morphofunctional unit of CA CMC. For its name, we suggest using the term “sarcosome”. The CMC sarcosome model is a low cylinder whose base diameter is equal to the diameter of the CMC cross section (d , μm), and the height is to the length of the sarcomere l , μm (the distance between the two Z lines). SA sarcosomes are permeated with a variety of cavities in shape and size, inside of which circulates sarcoplasm, the core, organelles and inclusions are localized. Depending on the location, shape and size of the cavities, sarcosomes are divided into three types. Transverse. They are in contact with the VD (CMC boundaries) and have practically no cavities. Central, contain the largest in size cavity in which the core, synthetic apparatus, a set of rounded shape Mx and inclusions are located. Intermediate. In the longitudinal cavities of these sarcosomes are the chains of mitochondria of elongated form and numerous inclusions.

Key words: cardiomyocyte, contractile apparatus (CA) CMC, sarcosome, geometric model of CA CMC.

Стаття надійшла 25.03.2018 року