

Р. Г. ЛЮДКОВСКАЯ и Н. Ю. АЛЕКСЕЕНКО

**СТРУКТУРНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ
СКЕЛЕТНОЙ МЫШЦЫ ЛЯГУШКИ В ГИПЕРТОНИЧЕСКИХ
И ГИПОТОНИЧЕСКИХ РАСТВОРАХ**

(Представлено академиком Л. А. Орбели 27 XII 1949)

При исследовании значения поперечно-полосатой структуры для сократительных свойств мышцы представляется существенным сопоставление изменений этой специфической структуры с функциональными изменениями мышцы. С этой целью в настоящей работе мы подвергали скелетную мышцу лягушки действию гипотонических и гипертонических растворов и при этом вели наблюдение над микроскопической структурой, функциональным состоянием мышцы и содержанием в ней воды. Такое наблюдение в то же время имеет значение для выяснения механизма действия анизотонических растворов на поперечно-полосатую мышцу.

По литературным данным, поперечная полосатость при длительных воздействиях гипотонических растворов хлористого натрия или разбавленных растворов Рингера сглаживается⁽²⁾, или, как и двойное лучепреломление, совсем исчезает^(6, 8); по другим наблюдениям, оба эти показателя не меняются⁽⁷⁾. В гипотонических растворах усиливается витальная окраска мышцы, что совпадает с потерей возбудимости^(1, 2, 5). В гипертонической среде поперечная исчерченность сохраняется^(2, 6, 8), а двойное лучепреломление остается неизменным⁽⁶⁾ или сильно падает⁽⁷⁾. Повышения витального окрашивания мышечной ткани в гипертонических растворах не обнаружено^(1, 2, 5).

Задачи нашей работы требовали наблюдения над прижизненными структурными изменениями мышцы в их динамике. Для этой цели мы регистрировали дифракционный спектр скелетной мышцы, возникающий в результате дифракции проходящего сквозь мышцу света на ее поперечно-полосатой структуре и отражающий изменения этой структуры. Так, изменение расстояния между порядками спектра свидетельствует об удлинении или укорочении саркомеров (постоянной дифракционной решетки), а перераспределение интенсивности порядков спектра связано с изменением соотношения размеров анизотропных и изотропных элементов, составляющих саркомер⁽³⁾.

В светонепроницаемую камеру с двумя стеклянными окошками, расположенными по ходу светового пучка, подвешивалась вплотную к выходному окошку скелетная мышца (*m. sartorius* или *m. rectus abdominis*) лягушки. Слегка сходящийся пучок монохроматического света падал на небольшой участок мышцы (меньше 1 мм²). Возникающий дифракционный спектр мышцы с 3—4 порядками убывающей интенсивности наблюдался визуально или фотографировался. Относительная яркость порядков спектра и расстояние между ними определялись путем

фотометрии снимков по степени почернения пленки (методику см. подробнее в (3)). Мышца находилась в изометрических условиях. Толщина наблюдаемого участка мышцы фиксировалась узкой покровной пластинкой с небольшим отверстием для светового пучка и для доступа наполнявшего камеру раствора к наблюдаемому участку мышцы. После каждого снимка дифракционного спектра определялись реобаза и хронаксия, и миографически регистрировалось одиночное сокращение мышцы. В начале и в конце опыта мышца взвешивалась.

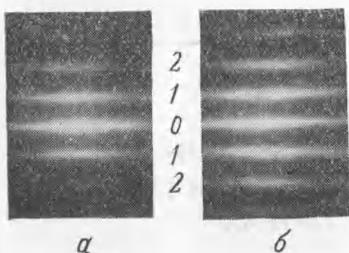


Рис. 1. Дифракционный спектр мышцы (опыт 3 V 1949): *a* — в изотоническом растворе, *б* — в гипотоническом растворе (при разведении в 3 раза)

Мышцы находились в растворе различное время: в одних опытах 10—15 мин., в других — около часа. Регистрация дифракционного спектра и функционального состояния производилась каждые 5 мин. Действие анизотонических растворов было испытано на 64 мышцах весенних и осенних лягушек. При этом наблюдались отчетливые и характерные изменения дифракционного спектра, уровня возбудимости и силы сокращения.

В гипотонических растворах при всех испытанных разведениях уже в первые минуты значительно возрастала интенсивность всех порядков спектра (рис. 1) или росла яркость только высших порядков, а интенсивность нулевого порядка падала (перераспределение интенсивности) (рис. 2). Расстояние между порядками не менялось. Одновременно уменьшались реобаза (в 2—2,5 раза) и хронаксия (в 2—3,5 раза) и росла высота сокращения (в 1,5—2 раза). Следует указать, что при длительных опытах эти характерные изменения не удерживались на все время наблюдения и через 20—60 мин. (в зависимости от разведения раствора), наоборот, сменялись падением яркости всех порядков спектра значительно ниже исходного уровня, что сопровождалось также резким снижением уровня возбудимости и силы сокращения.

Прирост веса мышцы за час пребывания в гипотонических растворах составлял, в зависимости от разведения, от 13 до 74%. Попутно отметим, что возрастание веса мышцы наблюдалось и в физиологиче-

Испытывалось действие гипотонических растворов хлористого натрия, разбавленных растворов Рингера в разведении от 1,25 до 4 и гипертонических растворов в концентрациях от 1,25 до 4, считая изотоническую концентрацию за единицу. Эти концентрации не вызывали контрактуры в изометрических условиях нашего опыта, а возбудимость и сократимость мышцы сохранялись при этом длительное время. Дифракционный спектр мышцы, ее функциональное состояние и вес в гипертонических и гипотонических условиях сравнивались с предварительными контрольными измерениями, произведенными в физиологическом или рингеровском растворе.

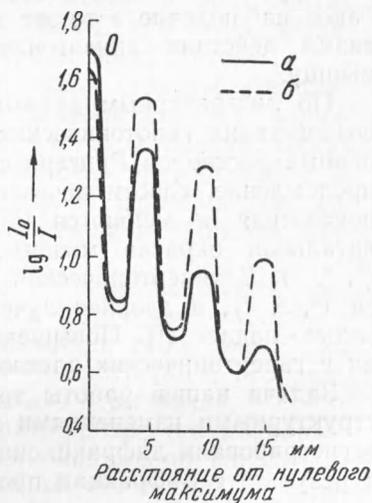


Рис. 2. Кривая распределения интенсивности в порядках дифракционного спектра мышцы (опыт 4 IV 1949): *a* — в изотоническом растворе, *б* — в гипотоническом растворе (при разведении в 3 раза)

ском растворе, а иногда и в растворе Рингера и сопровождалось, наряду с функциональными изменениями, также постепенным изменением оптических показателей (интенсивности дифракционного спектра), которые через некоторое время устанавливались на новом уровне и далее не менялись. Это лишний раз указывает на необходимость выдерживать перед опытом изолированную мышцу около часа в физиологическом растворе.

В гипертонических растворах изменения в мышце носили иной характер. При всех испытанных концентрациях также происходили характерные неоднократные изменения интенсивности спектра, но здесь перераспределение интенсивности имело обратное направление, т. е. яркость нулевого порядка возрастала, а яркость высших порядков значительно уменьшалась (рис. 3 и 4). Иногда перед этим удавалось уловить картину общего падения интенсивности всех порядков. Расстояние между порядками здесь, так же как и в гипотонических растворах, не менялось, что указывает на неизменность величины саркомеров. Одновременно возрастали реобазы и хронаксия (в 2—3 раза) и значительно (в 3—5 раз) уменьшалась высота одиночного сокращения.

Потеря веса мышц в гипертоническом растворе была много меньше соответствующего относительного прироста ее веса в гипотонических растворах. Падение веса составляло, в зависимости от концентрации, от 2 до 11% за час. В ряде случаев в растворах полуторной или двойной концентрации описанные характерные изменения дифракционного спектра и функционального состояния наступали в мышце без изменения веса.

Изменения дифракционного спектра, наблюдавшиеся нами в анизотонических условиях, оказывались, так же как и функциональное состояние, обратимыми при смене этих растворов на изотонический раствор. Поскольку в наших условиях не менялась ни общая длина мышцы, ни толщина наблюдаемого участка, ни величина саркомеров, то обнаруженные изменения спектра можно отнести лишь за счет перестройки микроскопических элементов внутри саркомера. Неоднородные изменения интенсивности в порядке дифракционного спектра показывают, что они вызываются неоднородными изменениями в анизотропных и изотропных элементах саркомеров, приводящими к изменению соотношения их размеров (I/A).

Перераспределение интенсивности в спектре мышцы, идущее в концентрированных и разбавленных растворах в разных направлениях, показывает, в свою очередь, что изменения поперечной полосатости в гипертонических и

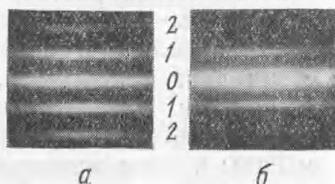


Рис. 3. Дифракционный спектр мышцы (опыт 11 IV 1949): а — в изотоническом растворе, б — в гипертоническом растворе (при 3-кратной концентрации)

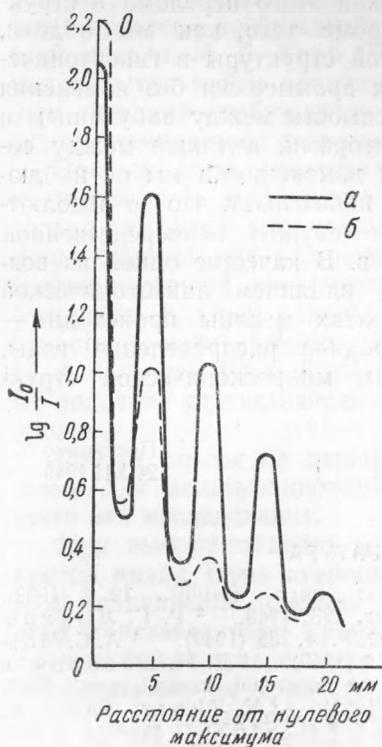


Рис. 4. Кривая распределения интенсивности в порядках дифракционного спектра мышцы (опыт 11 IV 1949): а — в изотоническом растворе, б — в гипертоническом растворе (при 3-кратной концентрации)

гипотонических растворах направлены в противоположные стороны. Наблюдавшиеся наряду с перераспределением интенсивности однородные изменения спектра, т. е. ослабление или повышение яркости всех его порядков при неизменных микроскопических отношениях, могут быть объяснены лишь субмикроскопическими коллоидными процессами, которые непосредственно связаны с изменением содержания воды в мышце. Эти общие коллоидные изменения, повидимому, служат основой для микроскопической перестройки и также идут в гипертонических и гипотонических растворах в противоположных направлениях.

Как мы видели, изменения структуры, с одной стороны, и возбудимости и силы мышечного сокращения, с другой, протекают в соответствии друг с другом и, очевидно, определяются общими внутренними причинами. Так, уменьшению яркости высших порядков спектра мышцы в гипертонических растворах сопутствует понижение возбудимости мышцы и силы мышечного сокращения. Параллельно усилению яркости высших порядков спектра в гипотонических растворах идет повышение функционального уровня мышцы — возбудимость и сила сокращения растут. Характерно, что наступающее вслед за этим вторичное обратное изменение спектра — ослабление его яркости — сопровождается ухудшением функционального состояния. Это последующее поблидение спектра связано, очевидно, с ослаблением поперечной исчерченности мышцы, которое и наблюдалось ранее (², ⁶, ⁸) в гипотонических растворах.

В то же время набухание мышцы, не потерявшей возбудимости, происходит довольно равномерно, не отражая этого перелома в структурных и функциональных изменениях. Кроме того, как мы видели, значительные изменения поперечно-полосатой структуры в гипертонической среде протекали в некоторых случаях практически без изменения веса мышцы. Таким образом, прямой зависимости между набуханием и возбудимостью, отмеченной некоторыми авторами, а также между содержанием воды в мышце и структурными изменениями мы не наблюдали*. Это отсутствие прямой зависимости показывает, что не абсолютное изменение содержания воды в мышце служит непосредственной причиной наблюдаемых структурных сдвигов. В качестве одной из возможных причин можно допустить, что под влиянием анизотонической среды в анизотропных и изотропных элементах мышцы происходит — вследствие различия их свойств — неоднородное распределение воды, что и приводит к неоднородным изменениям микроскопической структуры.

Лаборатория биофизики
Физиологического института им. И. П. Павлова
Академии наук СССР

Поступило
24 XII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. А. Браун и М. Ф. Иванов, *Арх. анат., гист. и эмбр.*, 12, 3 (1933).
² И. Е. Камнев, *Сборн. Памяти А. А. Заварзина*, 493, 1948. ³ Р. Г. Людковская, *Тр. Физиол. ин-та им. И. П. Павлова АН СССР*, 4, 235 (1949). ⁴ А. С. Мозжухин, *Бюлл. эксп. биол. и мед.*, 27, 2, 119 (1949). ⁵ Д. Н. Насонов и В. Я. Александров, *Реакция живого вещества на внешние воздействия*, 1940.
⁶ W. Biedermann, *Ergebn. d. Biologie*, 2, 416 (1927). ⁷ V. Ebner, *Sitzber. d. Akad. Wien, Math.-naturw. Kl., III Abt.*, 129 (1929). ⁸ H. Stübel, *Arch. f. d. ges. Physiologie*, 180, 209 (1920).

* Отсутствие зависимости между набуханием и возбудимостью отмечено также А. С. Мозжухиным (4).