

УДК 577.29

СКОРОСТНО-СИЛОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СПОРТСМЕНОВ КАК ПРЕДИКТОР СОДЕРЖАНИЯ В МЫШЦЕ БЫСТРЫХ МЫШЕЧНЫХ ВОЛОКОН

© 2020 г. Е. А. Лысенко^{1,2,*}, Т. Ф. Вепхвадзе¹, Е. М. Леднев¹,
П. И. Бобылева^{1,2}, И. В. Федюшкина³, Е. А. Семенова^{3,4},
Э. В. Генерозов³, О. Л. Виноградова^{1,2}, Д. В. Попов^{1,2}

¹ФГБУН ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ФГБУ Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины
Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

⁴ФГАОУ ВО Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*E-mail: e.a.lysenko@gmail.com

**E-mail: Lysenko@imbp.ru

Поступила в редакцию 17.02.2020 г.

После доработки 07.04.2020 г.

Принята к публикации 05.06.2020 г.

Цель работы состояла в исследовании возможности предсказания соотношения быстрых и медленных мышечных волокон в скелетной мышце мужчин различной спортивной специализации с помощью тестирования скоростно-силовых возможностей мышц. Для этого у 23 спортсменов (11 спортсменов, тренирующих выносливость, и 12 спортсменов, тренирующих силу) определяли максимальный момент силы мышц-разгибателей коленного сустава на различных угловых скоростях в изокинетическом режиме и соотношение быстрых и медленных мышечных волокон (МВ) в биопсических пробах латеральной головки четырехглавой мышцы бедра. Спортсмены, тренирующие силу, существенно превосходили спортсменов, тренирующих выносливость, по массе тела, индексу массы тела, объему четырехглавой мышцы бедра, абсолютным и относительным (удельная сила) максимальным моментам силы при 30, 180 и 300 град/с. Средняя площадь поперечного сечения (ППС) быстрых МВ и относительная площадь быстрых МВ на поперечном гистохимическом мышечном срезе в группе, тренирующей силу, существенно превосходили значения этих показателей в группе, тренирующей выносливость. Для медленных мышечных волокон различий между группами выявлено не было. В общей группе добровольцев ($n = 23$) относительная площадь, занимаемая быстрыми МВ на поперечном срезе, достоверно коррелировала с максимальным моментом силы на высоких угловых скоростях ($r = 0.51$ и $p = 0.01$ при 180 град/с, $r = 0.47$ и $p = 0.02$ при 300 град/с). Не было обнаружено корреляции между этими показателями ни в группе спортсменов, тренирующих силу, ни в группе спортсменов, тренирующих выносливость. Полученные результаты свидетельствуют о невысокой точности предсказания содержания быстрых МВ в латеральной головке четырехглавой мышцы бедра, рассчитанного по результатам скоростно-силового тестирования мышц разгибателей коленного сустава в изокинетическом режиме у спортсменов различной специализации. Наличие значимой корреляции между содержанием быстрых МВ и удельной силой при высоких угловых скоростях в общей группе (23 чел.) было обусловлено наличием двух существенно различающихся по этим показателям подгрупп.

Ключевые слова: скелетная мышца, быстрые мышечные волокна, скоростно-силовое тестирование, биопсия мышцы.

DOI: 10.31857/S0131164620060053

Основная функция скелетной мышцы — сокращение. При этом в зависимости от сопротивления, которое необходимо преодолеть, мышца может развить большее или меньшее усилие. Эту особенность работы скелетной мышцы обеспечивает ее дискретная структура. Функциональным

элементом нервно-мышечного аппарата является двигательная единица (ДЕ) — мотонейрон и иннервируемая им группа мышечных волокон (МВ). Мотонейроны, иннервирующие мышцу, могут существенно различаться по размеру и количеству иннервируемых ими МВ. Мотонейроны

меньшего размера имеют низкий порог возбуждения и иннервируют меньшее количество МВ, тогда как мотонейроны большего размера имеют высокий порог возбуждения и иннервируют большее количество МВ [1]. При мышечном сокращении активируются в первую очередь низкопороговые ДЕ, а по мере увеличения нагрузки включаются все более высокопороговые ДЕ. Такой механизм рекрутирования ДЕ был сформулирован как принцип Хеннемана (*E. Henneman*) [2]. Низкопороговые мотонейроны иннервируют МВ, экспрессирующие медленную I изоформу тяжелых цепей миозина, тогда как высокопороговые мотонейроны иннервируют МВ, экспрессирующие быстрые изоформы IIa и IIx. Быстрые и медленные МВ отличаются не только скоростью развития мышечного усилия, но и устойчивостью к утомлению [1]. Такая организация нервно-мышечного аппарата обуславливает необходимый уровень активации мышц в зависимости от выполняемой задачи.

При взрывном типе мышечного сокращения, когда необходимо развить максимальное усилие за минимальное время, высокопороговые и низкопороговые мотонейроны активируются практически одновременно [3]. Благодаря тому, что скорость распространения импульса по аксонам высокопороговых мотонейронов выше, чем по аксонам низкопороговых мотонейронов [4], а скорость распространения потенциала действия по сарколемме быстрых МВ [5] и скорость развития усилия быстрыми МВ выше [1] по сравнению с медленными МВ, развитие усилия в начальной фазе взрывного мышечного сокращения обусловлено активацией, главным образом, высокопороговых ДЕ. Благодаря этому скорость развития мышечного усилия в различных физиологических тестах зачастую используют для определения соотношения быстрых и медленных МВ в исследуемой мышце [6–10]. Определение соотношения быстрых и медленных МВ с помощью физиологического тестирования является актуальной задачей для определения предпочтительной спортивной специализации начинающих спортсменов. Но, не смотря на то, что скоростно-силовые возможности в процитированных исследованиях коррелировали с содержанием быстрых МВ, прогностическая ценность определения мышечной композиции с помощью физиологического тестирования существенно варьировала в различных исследованиях.

Хорошо известно, что быстрые и медленные МВ по-разному реагируют на физическую нагрузку. В частности, в быстрых мышечных волокнах в ответ на силовую нагрузку развивается более выраженный анаболический ответ [11, 12]. Исходя из этого, можно предположить, что у людей с различной мышечной композицией в ответ на одинаковую нагрузку может развиваться ана-

болический ответ разной выраженности. Для того, чтобы разделить людей в зависимости от мышечной композиции на группы для дальнейшего исследования эффективности различных тренировочных подходов, необходима неинвазивная простая в исполнении методика. Мы предположили, что тестирование скоростно-силовых возможностей с помощью изокинетического динамометра позволит решить эту задачу. Для проверки эффективности такого разделения выявляли взаимосвязь между скоростно-силовыми показателями и содержанием быстрых мышечных волокон, полученными с помощью окрашивания мышечных срезов антителами против быстрых и медленных изоформ тяжелых цепей миозина.

МЕТОДИКА

В эксперименте участвовали мужчины (в возрасте от 21 до 49 лет), занимавшиеся силовыми или циклическими видами спорта. Добровольцев разделили на две группы: в группу тренирующих аэробные возможности отобрали 11 чел. (7 чел. — стайерский бег, 2 — триатлон, 2 — шоссейные велогонки; средний возраст 36[30–40] лет) и в группу тренирующих силовые и скоростно-силовые возможности — 12 чел. (5 чел. — пауэрлифтинг, 4 — спринтерский бег, 2 — тяжелая атлетика, 1 — спринтерские велогонки; средний возраст 28[25–30]). Среди добровольцев были как спортсмены-любители (9 чел.), так и высококвалифицированные спортсмены (кандидаты в мастера спорта и мастера спорта; 14 чел.).

Антропометрические измерения. Перед началом исследования определяли рост и массу тела добровольцев. В группе спортсменов, тренирующих выносливость, средний рост составил 178[175–182] см, масса тела 74[70–78] кг, ИМТ 22.4[21.6–24.8] кг/м². В группе спортсменов, тренирующих силу, средний рост составил 183[181–185] см, масса тела 85[82–95] кг, ИМТ 25.7[23.8–28.3] кг/м². Также определяли объем четырехглавой мышцы бедра тестируемой ноги. Для этого определяли разницу между высотой передней подвздошной ости и латерального мышелка бедренной кости, обхват таза и обхваты бедра в его проксимальной, медиальной и дистальной частях, толщину подкожно-жировых складок на ягодице, проксимальной, медиальной и дистальной частях передней поверхности бедра. Для определения объема четырехглавой мышцы бедра, полученные данные подставляли в уравнение регрессии, полученное ранее [13]. Антропометрические измерения проводили в тот же день, что и определение скоростно-силовых возможностей непосредственно перед силовым тестированием.

Тестирование скоростно-силовых возможностей разгибателей коленного сустава спортсменов.

Предварительно добровольцы получили инструкцию исключить объемные или высокоинтенсивные тренировки за 3 дня до тестирования. Тестирование скоростно-силовых возможностей мышц-разгибателей коленного сустава проводили с помощью изокинетического динамометра *Pro System 3* (*Biodex*, США). Доброволец сидел в кресле динамометра таким образом, чтобы угол в тазобедренном суставе составлял 95° , а угол в коленном суставе — 90° . Затем таз фиксировали в кресле с помощью ремня и совмещали ось вращения рычага динамометра и ось движения коленного сустава. Подушку рычага динамометра с помощью ремня фиксировали на голени на 5 см проксимальнее медиального мыщелка большеберцовой кости. Перед тестированием добровольцы выполняли несколько движений в изокинетическом режиме (60 град/с) с умеренным усилием для разминки тестируемой мышечной группы. После разминки добровольцам давали инструкцию выполнять разгибание ноги в коленном суставе максимально быстро и максимально сильно. Сначала добровольцы выполняли 5–6 попыток в изокинетическом режиме при угловой скорости 300 град/с, через 2 мин отдыха — 3–4 попытки в изокинетическом режиме при угловой скорости 180 град/с, и через 2 мин отдыха — 2–3 попытки в изокинетическом режиме при угловой скорости 30 град/с. Переход от высоких угловых скоростей к низким и достаточно длительные интервалы отдыха между тестированием на различных угловых скоростях препятствовали развитию мышечного утомления. Аналоговые сигналы преобразовывали с помощью аналого-цифрового преобразователя E14-140M (ООО “Л Кард”, Россия) и регистрировали с помощью программы *PowerGraph 2.1* (ООО “ДИСофт”, Россия). Для дальнейшего анализа использовали моменты силы, зафиксированные при выполнении наилучших попыток.

Мышечная биопсия. Биопсию из латеральной головки четырехглавой мышцы бедра брали в отдельный день, за три дня до которого добровольцы получили инструкцию исключить высокоинтенсивные и длительные физические нагрузки. В день биопсии добровольцы приходили в лабораторию и ложились на кушетку на 10 мин для стандартизации распределения жидкости по телу. Затем под местной анестезией (2% раствор лидокаина) из медиальной части брюшка латеральной головки четырехглавой мышцы бедра осуществляли забор мышечной ткани с помощью модифицированной иглы Бергстрёма (*J. Bergström*) с аспирацией [14]. Полученные кусочки ткани очищали от крови и соединительной ткани и примораживали в жидком азоте к подложке с помощью монтирующей среды *Tissue Tek* (*Sakura Finetek*, Япония) таким образом, чтобы волокна располагались перпендикулярно подложке. По-

лученные препараты хранили при -80°C для последующего использования.

Иммуногистохимическое окрашивание мышечных срезов. Из ориентированных образцов мышечной ткани с помощью криостата *Leica CM1850* (*Leica Microsystems*, Германия) получали серийные, перпендикулярные ходу мышечных волокон, срезы толщиной 8 мкм. Срезы фиксировали на предметных стеклах с адгезивной поверхностью и инкубировали при комнатной температуре в течение 15 мин. После этого срезы отмывали 3 раза по 5 мин фосфатно-солевым буфером (PBS). Затем инкубировали в течение часа с антителами против изоформ тяжелых цепей миозинов I типа (медленного; M8421, 1 : 5000, *Sigma*, США) или IIa и IIx типов (быстрых; M4276, 1 : 600, *Sigma*, США). После инкубации с первичными антителами срезы отмывали 3 раза по 5 мин в PBS и помещали во вторичные антитела, конъюгированные с FITC (F0257, *Sigma*, США). После инкубации с вторичными антителами срезы отмывали 3 раза по 5 мин в PBS, помещали в среду, препятствующую выгоранию флуоресцентной метки *Slow FadeTM antifade reagent* (*Thermo Fisher Scientific*, США) и фиксировали интенсивность флуоресценции с помощью микроскопа *Nikon Eclipse Ti-U* (*Nikon*, Япония) при диапазоне возбуждения 480 ± 17 нм и пропускания 517 ± 23 нм, 20-кратном увеличении и экспозиции 600 мс. Серийные срезы, окрашенные антителами против быстрых и медленных изоформ тяжелых цепей миозинов, фотографировали отдельно. Дальнейший анализ изображения проводили с помощью программы *ImageJ* (*NIH*, США). Отдельно на обоих срезах считали долю окрашенных волокон относительно их общего числа. Волокна, которые окрашивались как антителами против быстрых, так и антителами против медленных изоформ тяжелых цепей миозинов, считали гибридными. Также для быстрых и медленных мышечных волокон определяли среднюю ППС (для каждого типа вычислялась площадь не менее 100 волокон) мышечного волокна данного типа, а также определяли относительную площадь, занимаемую быстрыми и медленными мышечными волокнами на срезе.

$$\text{ОП}_6 = (\text{ППС}_6 N_6) / (\text{ППС}_6 N_6 + \text{ППС}_m N_m),$$

где ОП_6 — относительная площадь быстрых МВ, ППС_6 и ППС_m — средняя площадь поперечного сечения быстрых и медленных МВ, N_6 и N_m — число быстрых и медленных МВ на срезе.

Относительную площадь быстрых МВ на срезе ранее рассматривали в качестве показателя в наибольшей степени отражающего содержание быстрых МВ в целой мышце и влияющего на скоростно-силовые возможности человека [15].

Статистическая обработка данных. Статистическую обработку проводили с помощью пакета

Таблица 1. Антропометрические, скоростно-силовые и гистохимические показатели групп добровольцев

Показатели	Общая группа	Аэробные виды спорта	Силовые виды спорта	<i>p</i>
<i>n</i>	23	11	12	
Возраст, лет	30[27–35]	36[30–40]	28[25–30]	0.006
Рост, см	181[178–184]	178[175–182]	183[181–185]	0.016
Масса тела, кг	81[74–85]	74[70–78]	85[82–95]	<0.001
ИМТ, кг/м ²	24.6[22.8–26.0]	22.4[21.6–24.8]	25.7[23.8–28.3]	0.004
Объем <i>VL</i> , мл	1742[1664–1979]	1690[1602–1740]	1979[1741–2111]	0.004
Момент силы 300°/с, Нм	162[128–174]	128[122–136]	174[170–184]	<0.001
Момент силы 180°/с, Нм	194[146–225]	146[140–153]	225[221–235]	<0.001
Момент силы 30°/с, Нм	306[239–336]	232[198–250]	336[328–353]	<0.001
Момент силы 300°/с/Объем <i>VL</i>	0.085[0.077–0.093]	0.076[0.075–0.082]	0.093[0.086–0.097]	0.0003
Момент силы 180°/с/Объем <i>VL</i>	0.103[0.089–0.114]	0.089[0.085–0.091]	0.114[0.111–0.125]	<0.001
Момент силы 30°/с/Объем <i>VL</i>	0.160[143–179]	0.142[0.129–0.145]	0.179[0.164–0.187]	<0.001
Доля быстрых МВ	0.51[0.39–0.56]	0.49[0.33–0.56]	0.51[0.46–0.56]	0.41
Доля медленных МВ	0.49[0.44–0.61]	0.51[0.44–0.67]	0.49[0.44–0.54]	0.41
ППС быстрых МВ, мкм ²	6689[4655–7856]	4998[4397–6410]	7570[6654–10042]	0.006
ППС медленных МВ, мкм ²	5569[5016–6483]	5579[5250–5868]	5356[4986–6723]	0.976
Относительная площадь быстрых МВ	0.51[0.44–0.61]	0.49[0.28–0.53]	0.58[0.50–0.63]	0.039
Относительная площадь медленных МВ	0.49[0.39–0.56]	0.51[0.47–0.72]	0.42[0.37–0.50]	0.039

Примечание: данные представлены в виде медианы и межквартильного интервала. Значимость различий между группами спортсменов из аэробных и силовых видов спорта оценивали с помощью критерия Манна-Уитни.

GraphPadPrism 6 (GraphPad Software, США). Из-за небольшого размера выборок в группах спортсменов, тренирующих силу ($n = 12$) либо выносливость ($n = 11$), использовали непараметрическую статистику. Данные представляли в виде медианы и межквартильного интервала. Межгрупповые различия оценивали с помощью критерия Манна-Уитни. Корреляционный анализ проводили с помощью критерия Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки возможности предсказания мышечной композиции по тестированию скоростно-силовых возможностей в эксперимент были набраны 23 добровольца предположительно различающиеся по мышечной композиции. Для этого в исследование рекрутировали как стайеров, так и представителей силовых и скоростно-силовых видов спорта. Стайеры в данном случае выступали в качестве людей, с предположительно высоким процентом медленных МВ, тогда как спортсмены, тренирующие быстроту и силу (далее – спортсмены, тренирующие силу), напротив, с высоким содержанием быстрых МВ. При выборе групп добровольцев мы опирались на ранее опубликованные данные, в которых было по-

казано большее содержание быстрых МВ в мышцах спортсменов, тренирующих силу, по сравнению со спортсменами, тренирующими выносливость [10, 16, 17].

Антропометрические, скоростно-силовые показатели и показатели, характеризующие мышечную композицию, представлены в табл. 1. Как и ожидалось, группа спортсменов, тренирующих силу, существенно превосходила группу спортсменов, тренирующих выносливость, по массе тела, индексу массы тела, объему четырехглавой мышцы бедра, максимальным моментам силы при 30, 180 и 300 град/с, а также по относительным моментам силы (удельная сила) на всех угловых скоростях. При этом мы не обнаружили достоверных различий между группами по средней ППС медленных МВ, тогда как средняя ППС быстрых МВ и относительная площадь быстрых МВ в группе, тренирующей силу, существенно превосходили значения этих показателей в группе, тренирующей выносливость.

В дальнейшем мы оценили корреляционные зависимости между различными физиологическими и антропометрическими показателями с показателями, характеризующими мышечную композицию в общей группе добровольцев ($n = 23$). Значения коэффициентов корреляции Спирмена приведены в табл. 2. Максимальные моменты си-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Спирмена антропометрических, скоростно-силовых и гистохимических показателей общей группы добровольцев ($n = 23$)

№	Показатели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Рост												
2	Масса тела	0.46											
3	ИМТ	0.19	0.94										
4	Объем V_L	0.49	0.72	0.65									
5	Момент силы 300°/с	0.52	0.73	0.62	0.74								
6	Момент силы 180°/с	0.61	0.76	0.62	0.80	0.94							
7	Момент силы 30°/с	0.64	0.70	0.56	0.76	0.80	0.86						
8	Момент силы 300°/с/Объем V_L	0.17	0.23	0.15	0.10	0.65	0.50	0.46					
9	Момент силы 180°/с/Объем V_L	0.49	0.46	0.28	0.30	0.71	0.74	0.70	0.77				
10	Момент силы 30°/с/Объем V_L	0.40	0.34	0.21	0.21	0.49	0.53	0.72	0.69	0.85			
11	ППС быстрых МВ	0.33	0.56	0.53	0.50	0.56	0.59	0.56	0.20	0.37	0.28		
12	ППС медленных МВ	0.03	0.30	0.32	0.31	0.09	0.13	0.15	-0.24	-0.22	-0.11	0.55	
13	Относительная площадь быстрых МВ	0.05	0.15	0.11	0.01	0.34	0.28	0.27	0.47	0.51	0.34	0.43	-0.14
14	Относительная площадь медленных МВ	-0.05	-0.15	-0.11	-0.01	-0.34	-0.28	-0.27	-0.47	-0.51	-0.34	-0.43	0.14

Примечание: серым выделены коэффициенты корреляции при $p < 0.05$.

лы на трех угловых скоростях хорошо коррелировали с массой тела и объемом четырехглавой мышцы бедра. Известно, что как абсолютные силовые показатели, так и скоростно-силовые возможности, напрямую зависят от объема мышцы [18]. ППС быстрых МВ достоверно коррелировала с максимальными моментами силы на всех угловых скоростях. Относительная площадь, занимаемая быстрыми МВ на поперечном срезе, коррелировала с моментами силы, нормированными на объем четырехглавой мышцы бедра, при угловых скоростях 180 и 300 град/с. В ранее опубликованных исследованиях также было показано, что содержание в мышце быстрых МВ коррелирует с максимальным моментом силы на больших угловых скоростях [6–8].

На рис. 1 представлены диаграммы рассеяния для нормированных моментов силы при 180 и 300 град/с и относительной площади быстрых мышечных волокон на гистохимическом срезе. Индивидуальные значения распределились таким образом, что точки, соответствующие добровольцам из аэробной и силовой групп оказались в левой и правой частях диаграмм рассеяния. При этом между группами либо не было пересечений (при 180 град/с), либо пересечения были минимальными (при 300 град/с). Для того, чтобы проверить, не обусловлена ли корреляционная зависимость между содержанием быстрых МВ и удельной силой при высоких угловых скоростях наличием в выборке двух подгрупп, была проанализирована корреляционная взаимосвязь между этими показателями отдельно у спортсменов, тренирующих силу или выносливость. Не было

обнаружено корреляции между этими показателями в обеих группах спортсменов (рис. 2). Таким образом, наличие значимой корреляции между содержанием быстрых МВ и удельной силой при высоких угловых скоростях в общей группе (23 чел.) было обусловлено наличием двух существенно различающихся подгрупп. Корреляция между скоростью развития усилия мышцами ног и содержанием МВ IIId/x типа в латеральной головке четырехглавой мышцы бедра спортсменов, тренирующих выносливость или силу, ранее уже оценивалась [9]. Авторы не обнаружили корреляции между этими показателями у людей, тренирующих выносливость, но выявили сильную корреляционную связь в группе добровольцев, тренирующих силу. Этот результат авторы связали с особенностями нервно-мышечного управления и развитием способности рекрутировать высокопороговые ДЕ при адаптации спортсмена к силовым нагрузкам. В нашем исследовании корреляцию на уровне тенденции между содержанием быстрых МВ и удельной силой при высоких угловых скоростях также можно связать с развитием способности рекрутировать высокопороговые ДЕ в силовой группе. Более эффективное нервно-мышечное управление в группе спортсменов, тренирующих силу, подтверждается также тем, что она существенно превосходила группу спортсменов, тренирующих выносливость, по удельной силе на всех угловых скоростях (табл. 1).

Можно предположить, что эффективность нервно-мышечного управления и способность рекрутировать высокопороговые ДЕ могут различаться у добровольцев с различным уровнем трениро-

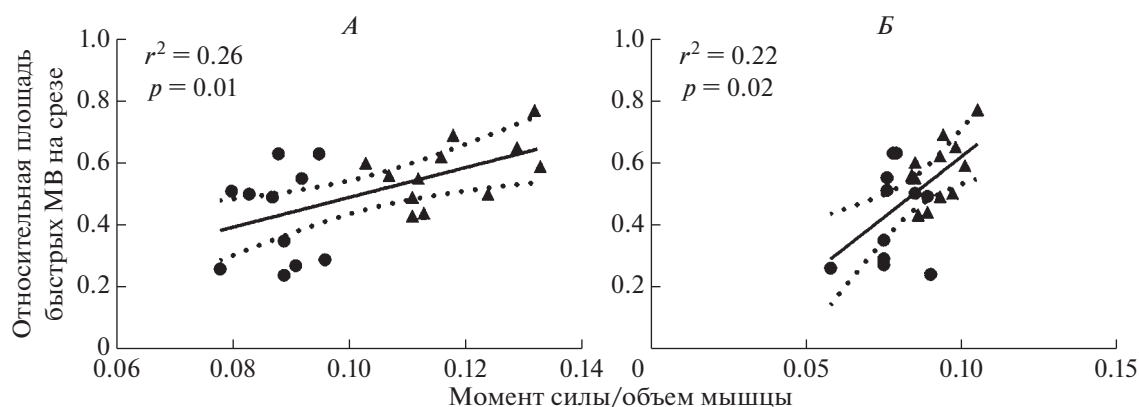


Рис. 1. Взаимосвязь относительной площади быстрых МВ на поперечном гистохимическом срезе, и максимального момента силы, нормированного на объем четырехглавой мышцы бедра, в общей группе добровольцев. А – при угловой скорости 180 град/с; Б – при угловой скорости 300 град/с. Кругами обозначены представители циклических видов спорта, треугольниками – силовых видов спорта. Сплошная линия – линейная аппроксимация; пунктирная линия – 95% доверительный интервал.

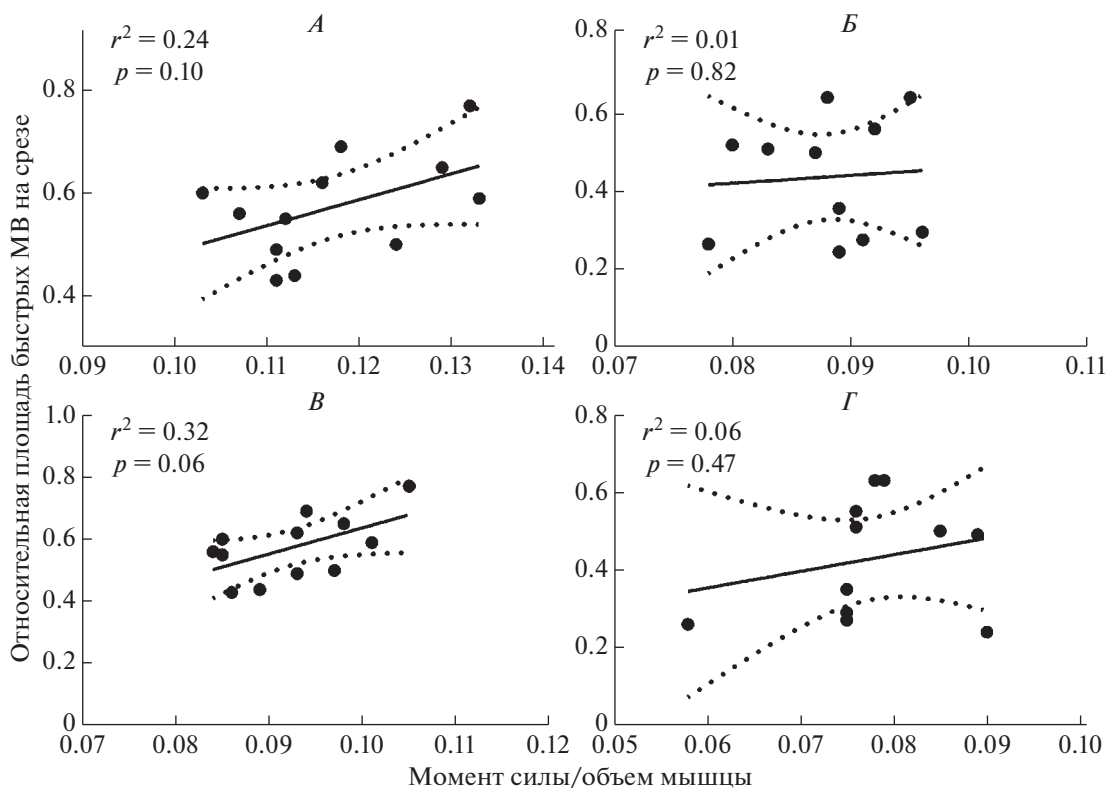


Рис. 2. Взаимосвязь относительной площади быстрых МВ на поперечном гистохимическом срезе, и максимального момента силы, нормированного на объем четырехглавой мышцы бедра, в группах добровольцев, тренирующих силу или выносливость. А – при 180 град/с в группе добровольцев, тренирующих силу; Б – при 180 град/с в группе добровольцев, тренирующих выносливость; В – при 300 град/с в группе добровольцев, тренирующих силу; Г – при 300 град/с в группе добровольцев, тренирующих выносливость. Сплошная линия – линейная аппроксимация; пунктирная линия – 95% доверительный интервал.

ванности. Для проверки этой гипотезы разделили добровольцев на группу низко- и высококвалифицированных спортсменов (КМС и выше).

В обеих группах не обнаружили значимой корреляционной взаимосвязи между содержанием быстрых МВ и удельной силой на высоких угло-

вых скоростях (данные не представлены). Также группы не отличались по удельной силе. Таким образом, удельная сила и взаимосвязь мышечной композиции и скоростно-силовых возможностей зависели от специализации спортсмена, а не от уровня его спортивных результатов.

Следует отметить, что в нашем исследовании возраст добровольцев различался (табл. 1). Таким образом, нельзя исключать роль возрастного фактора, как в межгрупповых различиях, так и в отсутствии корреляции мышечной композиции и скоростно-силовых возможностей в аэробной группе. Тем не менее, можно предполагать, что различие в среднем возрасте в 8 лет влияло на исследуемые показатели в меньшей степени, чем специализация спортсменов. Это предположение подтверждается исследованием *E. Van Roie et al.*, в котором было показано, что максимальная произвольная сила (МПС) и скорость развития мышечного усилия в группах 18–30 и 30–40 лет не различаются [19].

В разгибании ноги в коленном суставе все четыре головки четырехглавой мышцы бедра задействованы в разной степени, при этом мы брали биопсию только из латеральной головки. Известно, что латеральная головка может отличаться от других головок четырехглавой мышцы бедра по соотношению типов мышечных волокон [20]. Возможно слабая корреляция между мышечной композицией и скоростно-силовыми возможностями, наблюдавшаяся в нашем исследовании, была обусловлена именно этим фактом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы ставили перед собой задачу определить возможность ранжирования добровольцев в зависимости от мышечной композиции с помощью тестирования скоростно-силовых возможностей. Полученные результаты свидетельствуют о невысокой точности предсказания содержания быстрых МВ в латеральной головке четырехглавой мышцы бедра, рассчитанном по результатам скоростно-силового тестирования мышц разгибателей коленного сустава в изокинетическом режиме у спортсменов различной специализации. Наличие значимой корреляции между содержанием быстрых МВ и удельной силой на высоких угловых скоростях в общей группе спортсменов (23 чел.) было обусловлено наличием двух существенно различающихся по этим показателям подгрупп.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Комиссией по биомедицинской эти-

ке Института медико-биологических проблем РАН (Москва).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. РФФИ № 20-315-70034 “Роль центрального фактора (рекрутирование мышечных волокон разных типов и эффективность нервного управления) в регуляции анаболического сигнального ответа на силовое упражнение” в части анализа соотношения быстрых и медленных МВ и скоростно-силовых возможностей мышц спортсменов. РНФ № 17-15-01436 “Комплексный анализ вклада генетических, эпигенетических и средовых факторов в индивидуальную вариабельность состава мышечных волокон человека” в части формирования групп добровольцев, взятия образцов мышечной биопсии.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schiaffino S., Reggiani C.* Fiber types in mammalian skeletal muscles // *Physiol. Rev.* 2011. V. 91. № 4. P. 1447.
2. *Henneman E., Somjen G., Carpenter D.* Functional significance of cell size in spinal motoneurons // *J. Neurophysiol.* 1965. V. 28. P. 560.
3. *Del Vecchio A., Negro F., Holobar A. et al.* You are as fast as your motor neurons: speed of recruitment and maximal discharge of motor neurons determine the maximal rate of force development in humans // *J. Physiol.* 2019. V. 597. № 9. P. 2445.
4. *Burke R.* Motor unit types of cat triceps surae muscle // *J. Physiol.* 1967. V. 193. P. 141.
5. *Stalberg E.* Propagation velocity in human muscle fibers in situ // *Acta Physiol. Scand Suppl.* 1966. V. 287. P. 1.
6. *Coyle E.F., Costill D.L.* Leg extension power and muscle fiber // *Med. Sci. Sport.* 1979. V. 11. № 1. P. 12.
7. *Ivy J.L., Withers R.T., Brose G. et al.* Isokinetic Contractile Properties of the Quadriceps with Relation to Fiber Type // *Eur. J. Appl. Physiol.* 1981. V. 47. P. 247.
8. *Thorstensson A.L.F., Grimby G., Karlsson J.* Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles // *J. Appl. Physiol.* 1976. V. 40. № 1. P. 12.
9. *Methenitis S., Spengos K., Zaras N. et al.* Fiber type composition and rate of force development in endurance and resistance trained individuals // *J. Strength Cond. Res.* 2019. V. 33. № 9. P. 2388.
10. *Mathenitis S., Karandreas N., Spengos K. et al.* Muscle Fiber Conduction Velocity, Muscle Fiber Composition, and Power Performance // *Med. Sci. Sport. Exerc.* 2016. V. 48. № 9. P. 1761.

11. *Tannerstedt J., Apro W., Blomstrand E.* Regulation of Protein Metabolism in Exercise and Recovery Maximal lengthening contractions induce different signaling responses in the type I and type II fibers of human skeletal muscle // *J. Appl. Physiol.* 2009. V. 106. № 4. P. 1412.
12. *Koopman R., Zorenc A., Gransier R. et al.* Increase in S6K1 phosphorylation in human skeletal muscle following resistance exercise occurs mainly in type II muscle fibers // *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 2005. V. 290. № 6. P. 1245.
13. *Воронов А.В.* Анатомические поперечники мышц и объемы мышц нижней конечности // *Физиология человека.* 2003. Т. 29. № 2. С. 81.
Voronov A. [Anatomical cross-sectional areas and volumes of the lower extremity muscles] // *Fiziol. Cheloveka.* 2003. V. 29. № 2. P. 81.
14. *Bergström J.* Muscle electrolytes in man // *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 1962. V. 14. № 68. P. 511.
15. *Попов Д.В., Мисина С.С., Лемешева Ю.С. и др.* Финальная концентрация лактата в крови и аэробная работоспособность // *Физиология человека.* 2010. Т. 36. № 3. С. 102.
Popov D., Missina S., Lemesheva Y. et al. [Final blood lactate concentration after incremental test and aerobic performance] // *Fiziol. Cheloveka.* 2010. V. 36. № 3. P. 102.
16. *Coyle E., Bell S., Costill D., Fink W.* Skeletal muscle fiber characteristics of world class shot-putters // *Res. Q.* 1978. V. 49. № 3. P. 278.
17. *Costill D., Fink W., Pollock M.* Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners // *Med. Sci Sport.* 1976. V. 8. № 2. P. 96.
18. *Sale D.G., Macdougall J.D., Alway S.E., Sutton J.R.* Voluntary untrained strength and muscle characteristics in men and women and male bodybuilders // *J. Appl. Physiol.* 1987. V. 62. № 5. P. 1786.
19. *Van Roie E., Van Driessche S., Inglis A.J. et al.* Rate of power development of the knee extensors across the adult life span: A cross-sectional study in 1387 Flemish Caucasians // *Exp. Gerontol.* 2018. V. 110. P. 260.
20. *Edgerton V.R., Smith J.L., Simpson D.* Muscle fibre type populations of human leg muscles // *Histochem. J.* 1975. V. 7. P. 259.

Torque Production at Different Velocities as a Predictor of the Proportion of Fast-Twitch Muscle Fibers in Skeletal Muscle of Athletes

**E. A. Lysenko^{a, b, *, **}, T. F. Vepkhvadze^a, E. M. Lednev^b, P. I. Bobyleva^{a, b}, I. V. Fedyushkina^c,
E. A. Semenova^{c, d}, E. V. Generozov^c, O. L. Vinogradova^{a, b}, D. V. Popov^{a, b}**

^a*Institute of Biomedical Problems of the RAS, Moscow, Russia*

^b*Moscow State University, Moscow, Russia*

^c*Federal Research and Clinical Center of Physical-Chemical Medicine of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia*

^d*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

*E-mail: e.a.lysenko@gmail.com

**E-mail: Lysenko@imbp.ru

The aim of the study was to evaluate the possibility to predict the muscle fiber-type proportion in men of different sports specialization by testing the maximal torque production by knee extensors at different velocities. For this reason the proportion of fast- and slow-twitch muscle fibers (MFs) in m.vastus lateralis of 23 athletes (11 endurance and 12 strength trained athletes), as well the maximal torque production of knee extensors at various angular velocities in isokinetic mode were determined. The group of strength trained athletes significantly exceeded the group of endurance trained athletes in body mass, body mass index, volume of the m.quadriceps femoris, maximum torque production and specific force at 30, 180 and 300 degrees per second. In contrary to cross-sectional area (CSA) of slow-twitch MFs, the average CSA of fast-twitch MFs and the proportion of fast-twitch MFs in the strength trained group significantly exceeded those in the endurance trained group. In the combined group of volunteers (n = 23), the proportion of fast-twitch MFs significantly correlated with the torque production at high angular velocities (r = 0.51 and p = 0.01 at 180 deg/s; r = 0.47 and p = 0.02 at 300 deg/s). We did not find any correlation between these parameters in the separate groups of strength and endurance trained athletes. The results indicate a low accuracy in predicting the proportion of fast-twitch MF in m.vastus lateralis in athletes using the torque of knee extensors at different angular velocities. Significant correlation between the proportion of fast-twitch MF and torque at high angular velocities in the general group (n = 23) was due to the presence of two significantly different subgroups.

Keywords: skeletal muscle, fast-twitch muscle fibers, torque production at different velocities, muscle biopsy.