

УДК 612.82;612.83;612.821

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ КОРТИКО-СПИНАЛЬНОГО ТРАКТА И МОТОРНО-КОГНИТИВНЫЕ РЕАКЦИИ У СПОРТСМЕНОВ, ТРЕНИРУЮЩИХ СКОРОСТЬ, ВЫНОСЛИВОСТЬ И КООРДИНАЦИЮ ДВИЖЕНИЯ

© 2023 г. О. В. Ланская¹, *, Е. В. Ланская¹

¹ФГБОУ ВО Великолукская государственная академия физической культуры и спорта, Великие Луки, Россия

*E-mail: lanskaya2012@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.01.2022 г.

После доработки 31.05.2022 г.

Принята к публикации 10.06.2022 г.

Цель работы состояла в исследовании корково-спинальной возбудимости и проводящей способности моторной системы при помощи мышечных потенциалов, вызванных магнитной стимуляцией двигательной коры головного мозга и спинномозговых сегментов на уровне позвонков С6–С7 и Т12–L1, у спортсменов разных специализаций, и проведении корреляции этих параметров с психофизиологическими характеристиками. Установлено: 1) возбудимость корковых нейронов, моторных нейронов шейного и поясничного отделов спинного мозга, осуществляющих контроль за деятельностью мышц плеча, предплечья, бедра и голени, была самой высокой у стайеров, а самой низкой – у спринтеров; 2) наибольшей проводящей способностью кортико-спинального тракта (КСТ) обладали спринтеры и баскетболисты, а наименьшей – стайеры; 3) самая высокая скорость простой и сложной сенсомоторных реакций, которая служит показателем не только нейромоторных (лабильности и подвижности нервной системы), но и когнитивных процессов, характерна для спринтеров и баскетболистов; 4) в сравнении с другими спортсменами наибольшая точность сложных сенсомоторных реакций и способность предвидения хода событий, что является признаком успешности когнитивной деятельности, выявлена у баскетболистов; 5) корково-спинальная возбудимость положительно коррелировала с точностью движений (у баскетболистов) и отрицательно – с проводящей способностью КСТ и скоростью простой и сложной сенсомоторных реакций (у спринтеров и стайеров). Таким образом, для спортсменов, тренирующих скорость, выносливость и координацию движения, характерны отличительные особенности и взаимосвязь функционального состояния КСТ и моторно-когнитивных реакций.

Ключевые слова: спортсмены, магнитная стимуляция, мышечные вызванные потенциалы, психофизиологическое исследование, нейромоторные и когнитивные процессы.

DOI: 10.31857/S0131164622100022, **EDN:** APRRQG

Систематическое выполнение физических нагрузок сопровождается определенными адаптационными структурно-функциональными изменениями в центральной нервной системе (ЦНС), в частности, в отделах мозга, отвечающих за сознательный контроль и управление движениями [1, 2]. В последнее десятилетие опубликовано большое число научных материалов по применению метода магнитной стимуляции (МС) как инструмента исследования функционального состояния (ФС) кортико-спинального тракта (КСТ) у обычных людей и спортсменов [1–4]. Несмотря на широкое применение данного стимуляционного метода, недостаточно освещены вопросы об особенностях функциональных перестроек на разных уровнях регуляции движений (корковом и

спинальном) у спортсменов, адаптированных к многолетней разнонаправленной мышечной деятельности, различающейся: режимом функционирования скелетных мышц при выполнении физической работы, направленной на развитие приоритетных для конкретного вида спорта двигательных качеств; физиологическими особенностями совершаемых движений – стереотипные (стандартные) против ситуационных (нестандартных); кинематической характеристикой мышечной деятельности – циклической против ациклической; длительностью и интенсивностью выполняемой работы.

Следует отметить широко известный факт, что функциональные свойства мышц определяются составом входящих в них двигательных единиц

Таблица 1. Сведения о контингенте испытуемых

Специализация	Возраст (лет)	Длина тела (см)	Масса тела (кг)	Длина руки (см)
Баскетболисты	20.50 ± 3.32	187.71 ± 8.31	83.64 ± 12.74	91.25 ± 8.02
Бегуны-спринтеры	22.00 ± 1.80	171.43 ± 3.84	73.36 ± 4.62	74.36 ± 1.81
Бегуны-стайеры	23.07 ± 1.38	177.14 ± 1.56	72.00 ± 2.19	79.71 ± 1.54

(ДЕ), соотношение которых в мышцах спортсменов, специализирующихся в разных видах спорта, различно [5–7]. Для занимающихся силовыми видами спорта и спринтеров характерен высокий процент быстрых ДЕ; у стайеров преобладают медленные ДЕ; у представителей игровых видов спорта, бегунов на средние дистанции, метателей, единоборцев отмечается относительно равномерное распределение быстрых и медленных ДЕ в мышцах, несущих основную нагрузку. Медленные ДЕ, в отличие от быстрых характеризуются низкими порогами активации мотонейронов и медленной скоростью проведения нервного импульса по аксонам, а “медленные” мышечные волокна (МВ) отличаются высокой степенью устойчивости к утомлению и большой продолжительностью сокращения, но пониженной максимальной силой и скоростью сокращения. “Быстрые” МВ обладают высокой скоростью и силой сокращения, но высокой утомляемостью [7]. Вероятно, что физиологические свойства корковых и спинальных двигательных нейронов, центральных и периферических проводников нервной системы будут отличаться в зависимости от типа ДЕ в мышцах спортсменов разных специализаций.

В современной научной литературе известно понятие оптимального ФС спортсмена, которое включает в себя не только физическое или физиологическое “идеальное” состояние, но и оптимальное сочетание и развитие профессионально важных психофизиологических и психологических качеств, необходимых для конкретных видов спорта [8]. Основные свойства ЦНС определяют функциональную и психологическую подготовленность спортсменов, ответственную за спортивную эффективность. Большое количество психофизиологических исследований посвящено рассмотрению различных свойств ЦНС с учетом возраста, пола, специфики спортивной деятельности [9–13]. В многочисленных работах отмечается, что тесты на время реакции позволяют судить не только о сенсомоторных процессах, но и о чисто когнитивных [11–15]. Скорость реакции служит показателем индивидуального темпа протекания психофизиологических процессов как в ЦНС, так и в поведении, которую ассоциируют с уровнем когнитивных, физиологических и физико-химических процессов [15, 16]. Однако вопросу изучения когнитивного компонента двигательных действий спортсменов, занимающихся

разными видами спорта, уделяется недостаточное внимание.

Цель работы заключалась в исследовании корково-спинальной возбудимости и проводящей способности моторной системы при помощи мышечных потенциалов, вызванных МС разных отделов ЦНС и оценивающих ФС КСТ, и психофизиологических функций, а также взаимосвязей между этими параметрами у спортсменов, адаптированных к двигательной деятельности различной направленности.

Гипотеза исследования строится на предположении о том, что для спортсменов в зависимости от их специализации будут характерны отличительные особенности ФС кортико-спинальной системы двигательного контроля скелетных мышц, имеющих определенный композиционный состав МВ, а также нейромоторных и когнитивных реакций.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 42 спортсмена в возрасте 19–22 лет, специализирующихся в баскетболе ($n = 14$), легкоатлетическом беге на короткие – 100 м ($n = 14$) и длинные – 5000 м ($n = 14$) дистанции. Стаж спортивной деятельности составил от 10 до 12 лет. Спортивная квалификация спортсменов – I взрослый разряд, кандидат в мастера спорта. Конкретные сведения о контингенте испытуемых представлены в табл. 1.

Исследовательская работа состояла из двух серий исследований, первую из которых проводили с применением метода МС коркового и спинального уровней ЦНС. При транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) проекционных двигательных зон коры головного мозга (ГМ) для мышц правой нижней конечности (*m. biceps femoris*, *m. gastrocnemius medialis*), которая осуществлялась с помощью магнитного стимулятора *Magstim Rapid* (*Magstim Company Ltd.*, Великобритания), угловой койл с мощностью магнитного поля 1.4 Тесла (Т) позиционировали над краниометрической точкой на черепе *vertex*, а для мышц правой верхней конечности (*m. biceps brachii*, *m. flexor carpi radialis*) – над левым полушарием со смещением примерно на 5–7 см латеральнее *vertex* вдоль линии, соединяющей наружный слуховой проход и *vertex*. При МС спинного мозга на уровне С6–С7 и Т12–L1 позвонков использовали плоский

одинарный койл диаметром 70 мм с мощностью магнитного поля 2.6 Т [2–4]. При МС разных отделов ЦНС регистрировали параметры вызванных потенциалов (ВП) мышц в состоянии мышечного покоя: порог (Т); максимальную амплитуду (МА); латентный период (ЛП); время центрального моторного проведения (ВЦМП), определяемое по разности ЛП ВП при МС моторной коры и соответствующих спинномозговых сегментов.

Вторую серию исследований с участием баскетболистов, спринтеров и стайеров проводили с применением аппаратно-программного комплекса “Нейрософт-Психо-Тест” и ряда методик психофизиологического тестирования. При обследовании респондентов по каждой методике до контрольного теста проводили пробный, результаты которого в протокол не регистрировали. Используемые методики [17]:

1. Простая зрительно-моторная реакция (ПЗМР); международное название — *simple reaction time (SRT)*. *Предварительная инструкция.* Возьмите в ведущую руку прибор — зрительно-моторный анализатор (ЗМА). Палец держите на красной кнопке ЗМА. Время от времени будет появляться световой сигнал красного цвета. В ответ на него Вам следует как можно быстрее нажать на кнопку, стараясь при этом не допускать ошибок (ошибками считаются преждевременное нажатие кнопки и пропуск сигнала).

Оценку результатов по методике “ПЗМР” производили на основании: 1) времени ПЗМР (ВПЗМР); 2) коэффициента точности (КТ) Уиппла, который выявляет соотношение ошибок и правильных нажатий и вычисляется по формуле:

$$КТ = \frac{N - R}{N + P},$$

где N — число измерений (предъявленных сигналов), R — количество правильных нажатий, P — количество ошибок. Чем меньше данный показатель, тем выше степень точности выполнения заданий.

2. Реакция выбора (РВ); международное название — *choice reaction time (CRT)*. *Предварительная инструкция.* Возьмите в руку ЗМА. Время от времени на ЗМА будут появляться световые сигналы различного цвета. В ответ на основной сигнал Вам следует как можно быстрее нажать на левую (красную) кнопку панели ЗМА, а на второстепенный сигнал — на другую, стараясь не допускать ошибок. Цвет основного сигнала — красный, цвет второстепенного — зеленый.

Оценку результатов по методике “РВ” производили на основании среднего значения времени РВ (ВРВ), отражающего скорость сложной сенсомоторной реакции и КТ Уиппла.

3. Реакция различения (РР); международное название — *discrimination reaction time (DRT)*. *Предварительная инструкция.* Возьмите в руку ЗМА. В ответ на предъявление красного (основного) и зеленого (второстепенного) световых сигналов Вам следует как можно быстрее нажать на соответствующую кнопку на ЗМА, стараясь не допускать чрезмерных ошибок. На появление желтого светового сигнала реагировать не следует. Это считается ошибкой.

В результате тестирования оценивали те же показатели, что и для методик “ПЗМР”, “РВ”.

Число предъявляемых световых сигналов в тестах “ПЗМР”, “РВ”, “РР” — 70.

4. Реакция на движущийся объект (РДО); международный аналог — тест (реакция) на столкновение двух целей или реакция на перехват цели (*moving target interception*). *Предварительная инструкция.* Возьмите ЗМА в удобную для Вас руку так, чтобы палец свободно размещался на кнопке. На экране монитора изображена окружность, на которой в различных точках будут находиться две отметки, меняющие положение от предъявления к предъявлению движущегося объекта. От первой отметки по часовой стрелке с определенной скоростью (180 гр/с) будет происходить заливка окружности. Вам необходимо нажать на кнопку ЗМА в тот момент, когда заливка достигнет второй отметки (зеленой линии). При этом значение имеет не столько быстрота реагирования, сколько своевременность (точность) ответа на сигнал.

Число предъявлений движущегося объекта — 50. В результате тестирования оценивали число точных реакций, запаздываний и опережений.

С целью оценки взаимосвязи параметров ВП мышц с нейродинамическими характеристиками спортсменов для изучения механизмов формирования мышечных потенциалов, вызванных стимуляционным воздействием на моторную кору и спинномозговые сегменты, и реакций в ходе психофизиологического тестирования проводили корреляционный анализ.

Статистическую обработку результатов выполняли на персональном компьютере в программе “STATISTICA 10.0” (Statsoft Inc., США, 2010). В таблицах 1–4 приведены средние арифметические величины и показатели стандартного отклонения ($M \pm SD$). Межгрупповое сравнение результатов проводили с применением параметрического (однофакторный дисперсионный анализ с *post-hoc* анализом *Newman-Keuls*) или непараметрического (дисперсионный анализ *Kruskal-Wallis Anova*) методов. Для анализа взаимосвязи между нейро- и психофизиологическими параметрами рассчитывали коэффициенты корреляции *Pearson* или ранговой корреляции *Spearman*. Проверку нормальности распределения количе-

Таблица 2. Параметры вызванных потенциалов (ВП) при транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) у спортсменов

Параметры	Группы спортсменов	Мышцы			
		<i>m. biceps brachii</i>	<i>m. flexor carpi radialis</i>	<i>m. biceps femoris</i>	<i>m. gastrocnemius medialis</i>
Порог, Т	1. Баскетболисты	0.81 ± 0.12	0.59 ± 0.13	0.84 ± 0.13	0.79 ± 0.12
	2. Спринтеры	0.87 ± 0.15	0.71 ± 0.13	1.03 ± 0.24	0.85 ± 0.19
	3. Стайеры	0.71 ± 0.06	0.58 ± 0.08	0.67 ± 0.11	0.67 ± 0.09
	<i>p</i>	$p_{1-3}^* p_{2-3}^{**}$	$p_{1-2}^* p_{2-3}^{**}$	$p_{1-2}^* p_{1-3}^{**}$ p_{2-3}^{***}	$p_{1-3}^* p_{2-3}^*$
МА, мВ	1. Баскетболисты	0.36 ± 0.11	0.52 ± 0.15	0.37 ± 0.11	0.24 ± 0.09
	2. Спринтеры	0.06 ± 0.01	0.16 ± 0.07	0.16 ± 0.06	0.14 ± 0.05
	3. Стайеры	0.57 ± 0.14	0.69 ± 0.14	0.55 ± 0.13	0.50 ± 0.12
	<i>p</i>	$p_{1-2}^{**} p_{1-3}^*$ p_{2-3}^{***}	$p_{1-2}^* p_{2-3}^{**}$	$p_{1-2}^{**} p_{1-3}^*$ p_{2-3}^{***}	$p_{1-3}^* p_{2-3}^{**}$
ЛП, мс	1. Баскетболисты	11.90 ± 1.99	16.33 ± 0.67	21.84 ± 1.57	30.38 ± 1.76
	2. Спринтеры	11.72 ± 1.28	15.56 ± 0.18	21.56 ± 0.86	29.72 ± 1.47
	3. Стайеры	12.71 ± 0.80	17.28 ± 2.22	23.31 ± 0.88	32.59 ± 1.68
	<i>p</i>	p_{2-3}^*	p_{2-3}^*	$p_{1-3}^* p_{2-3}^{**}$	$p_{1-3}^* p_{2-3}^*$

Примечание: МА — максимальная амплитуда, ЛП — латентный период; *p* — достоверность различий между группами: * — <0.05; ** — <0.01; *** — <0.001.

ственных признаков проводили с помощью *Shapiro-Wilk's W test*. Статистически значимыми считали различия при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 и 3 представлены величины параметров ВП тестируемых мышц, зарегистрированные при ТМС, МС спинного мозга на уровне С6–С7 и Т12–L1 позвонков у представителей разных видов спорта. Так, у стайеров регистрировались самые низкие пороги и самые высокие показатели МА ВП при стимуляции разных отделов ЦНС, а у спринтеров — диаметрально противоположные характеристики ВП. Количественные величины этих параметров у баскетболистов занимал промежуточное положение между вышеназванными группами.

Среди обследованных групп спортсменов у стайеров обнаружена самая низкая, а у спринтеров самая высокая проводящая способность моторной системы, о чем свидетельствуют показатели ЛП ВП при стимуляции коркового и спинального уровней и ВЦМП. При этом значения данных параметров ВП у спринтеров были примерно сопоставимы с таковыми у баскетболистов, вследствие чего межгрупповые различия в большинстве случаев не выявлены (табл. 2, 3).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о различиях в параметрах ВП ске-

летных мышц, зарегистрированных при воздействии МС на структуры ЦНС у представителей разных видов спорта, и соответствуют рабочей гипотезе нашего исследования. В результате установлено, что для стайеров характерна самая высокая возбудимость корковых нейронов и мотонейронов шейного и поясничного утолщений спинного мозга, осуществляющих контроль деятельности мышц плеча, предплечья, бедра и голени, по сравнению с представителями других видов спорта. Данный факт может объясняться отличительными особенностями композиционного состава МВ скелетных мышц спортсменов и функциональных свойств, соответствующих ДЕ [5–7], о чем говорилось в начале работы. В мышцах спортсменов ДЕ соответствующего типа не просто преобладают, а составляют подавляющее большинство. Так, у одного из известных бегунов-спринтеров количество быстрых ДЕ в *m. gastrocnemius* достигало 95%, а у бегуна-стайера — 90% медленных ДЕ [7]. При этом у среднестатистического человека процентное содержание МВ типа I, входящих в состав ДЕ типа S, в *m. gastrocnemius lateralis* и *m. gastrocnemius medialis* составляет примерно 44–50% [7, 18]. Результаты собственных исследований указывают на более низкие пороги возбуждения (различия составляют при ТМС — 21.18%, $p < 0.05$ и МС спинного мозга — 28.48%, $p < 0.05$), более высокие значения МА (соответственно, 71.4%, $p < 0.01$ и 81.25%, $p < 0.001$) и ЛП (9.62%, $p < 0.05$ и 15.58%, $p < 0.01$) корковых и сегментарных ВП *m. gastrocnemius me-*

Таблица 3. Параметры вызванных потенциалов (ВП) при магнитной стимуляции (МС) спинного мозга у спортсменов

Параметры	Группы спортсменов	Мышцы и уровень стимуляции			
		на уровне позвонков С6–С7		на уровне позвонков Т12–L1	
		<i>m. biceps brachii</i>	<i>m. flexor carpi radialis</i>	<i>m. biceps femoris</i>	<i>m. gastrocnemius medialis</i>
Порог, Т	1. Баскетболисты	1.78 ± 0.36	1.73 ± 0.34	1.73 ± 0.28	1.86 ± 0.34
	2. Спринтеры	1.80 ± 0.33	1.76 ± 0.25	1.71 ± 0.26	1.94 ± 0.54
	3. Стайеры	1.41 ± 0.21	1.12 ± 0.10	1.25 ± 0.14	1.51 ± 0.30
	<i>p</i>	$p_{1-3}^{***} p_{2-3}^{**}$	p_{1-3}^{***} p_{2-3}^{***}	$p_{1-3}^{*} p_{2-3}^{*}$	p_{2-3}^{*}
МА, мВ	1. Баскетболисты	0.45 ± 0.10	0.50 ± 0.09	0.37 ± 0.13	0.36 ± 0.14
	2. Спринтеры	0.10 ± 0.06	0.26 ± 0.07	0.13 ± 0.07	0.12 ± 0.05
	3. Стайеры	0.88 ± 0.14	1.02 ± 0.18	0.65 ± 0.17	0.64 ± 0.19
	<i>p</i>	$p_{1-2}^{*} p_{2-3}^{**}$	p_{2-3}^{*}	$p_{1-2}^{**} p_{1-3}^{**}$ p_{2-3}^{***}	$p_{1-2}^{*} p_{1-3}^{*}$ p_{2-3}^{***}
ЛП, мс	1. Баскетболисты	5.57 ± 0.43	7.85 ± 0.86	6.50 ± 0.63	15.80 ± 1.37
	2. Спринтеры	5.30 ± 0.50	7.62 ± 0.72	6.07 ± 1.14	14.58 ± 0.73
	3. Стайеры	5.63 ± 0.85	8.01 ± 0.59	8.67 ± 1.48	17.27 ± 1.68
	<i>p</i>	p_{2-3}^{*}	p_{2-3}^{*}	p_{1-3}^{***} p_{2-3}^{***}	$p_{1-2}^{*} p_{1-3}^{*}$ p_{2-3}^{**}
ВЦМП, мс	1. Баскетболисты	6.93 ± 1.23	7.85 ± 0.86	15.34 ± 1.33	15.15 ± 2.16
	2. Спринтеры	6.72 ± 1.68	7.62 ± 0.72	15.49 ± 1.83	14.58 ± 1.42
	3. Стайеры	7.01 ± 0.54	8.01 ± 0.59	14.64 ± 1.24	15.74 ± 2.45
	<i>p</i>	Не выявлено достоверных различий между группами			

Примечание: ВЦМП – время центрального моторного проведения. Остальные обозначения см. табл. 2.

dialis у стайеров по сравнению со спринтерами (табл. 2 и 3), что может объясняться значительным превалированием у первых содержания (%) в этой мышце медленных, устойчивых к утомлению МВ типа I и уменьшением доли волокон типа II, в особенности быстрых, быстроутомляемых МВ типа II В в составе ДЕ типа FF, а у вторых – противоположным соотношением.

Существенные различия в величинах порогов возбуждения, МА и ЛП ВП между группами спринтеров и стайеров также могут быть обусловлены более эффективной синаптической передачей от кортико-спинальных нервных клеток к α -мотонейронам и уменьшением тормозного влияния интернейронной сети на нисходящие потоки и возбудимость α -мотонейронов [19] под влиянием долговременной адаптации к длительной работе на выносливость. Принимая во внимание тот факт, что у стайеров количество ДЕ типа S (медленных) и FR (быстрых, устойчивых к утомлению) больше, чем у спринтеров, в мышцах которых преобладают МВ типа II В, а также результаты исследований на предмет выраженности процессов торможения у спортсменов разных ви-

дов спорта [20], оправданно сделать заключение, что представители игрового и циклических видов спорта обладают разной координированной активностью нейрональных тормозных механизмов с меньшей ее выраженностью у стайеров в сравнении со спринтерами.

Безусловно, что отличия у спортсменов в показателях кортико-спинальной проводимости могут объясняться определенными различиями в их длине туловища и конечностей. Однако величины латентности ВП мышц и ВЦМП, в частности, у баскетболистов, у которых длина тела составила в среднем 187.71 ± 8.31 см, а длина руки 91.25 ± 8.02 см были меньше, чем у стайеров с длиной тела 177.14 ± 1.56 см и руки 79.71 ± 1.54 см (табл. 1). Следовательно, обнаруженный факт может зависеть и от других обстоятельств. Например, это зависимость от различного процента жировой ткани, влияющего на распространение электрического импульса у спортсменов, тренировочная и соревновательная деятельность которых имеет разнонаправленный характер [2].

Сравнивая полученные данные, следует отметить неодинаковую возбудимость двигательных

Таблица 4. Результаты психофизиологического исследования спортсменов

Методики и параметры		1. Баскетболисты	2. Спринтеры	3. Стайеры
ПЗМР	ВПЗМР, мс	206.21 ± 23.76	205.71 ± 22.40	212.10 ± 26.35
		$p_{1-3}^* p_{2-3}^*$		
	КТ Уиппла	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01
РВ	ВРВ, мс	399.14 ± 113.40	393.20 ± 112.50	406.29 ± 115.43
		$p_{1-2}^* p_{1-3}^* p_{2-3}^{**}$		
	КТ Уиппла	0.07 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.10 ± 0.03
		$p_{1-3}^* p_{2-3}^*$		
РР	ВРР, мс	403.07 ± 100.10	398.90 ± 103.45	417.30 ± 104.65
		$p_{1-2}^* p_{1-3}^{**} p_{2-3}^{***}$		
	КТ Уиппла	0.06 ± 0.02	0.07 ± 0.02	0.12 ± 0.03
		$p_{1-3}^* p_{2-3}^*$		
РДО	Число точных реакций	29.90 ± 1.19	28.21 ± 0.97	27.00 ± 1.30
		$p_{1-2}^* p_{1-3}^{**} p_{2-3}^*$		
	Число запаздываний	10.00 ± 0.83	11.43 ± 1.28	11.80 ± 1.31
		$p_{1-2}^* p_{1-3}^*$		
	Число опережений	10.90 ± 0.83	11.40 ± 1.27	11.79 ± 1.33
		$p_{1-2}^* p_{1-3}^*$		

Примечание: ПЗМР – простая зрительно-моторная реакция, ВПЗМР – время ПЗМР, КТ – коэффициент точности, РВ – реакция выбора, РР – реакция различения, РДО – реакция на движущийся объект. Остальные обозначения см. табл. 2.

нейронов, расположенных в различных структурах ЦНС. Для корковых нейронов характерна более высокая возбудимость, чем для спинномозговых сегментов. Об этом свидетельствуют самые низкие значения магнитной индукции для вызова пороговых ответов при ТМС у всех обследованных лиц (табл. 2, 3). Это, с одной стороны, может быть связано с возбуждающими и тормозными эффектами ТМС, но для проверки этого предположения необходимо изучение данного вопроса, который в настоящее время остается малоизученным, в отличие от функциональной активности спинального торможения у спортсменов. С другой стороны, в нашем исследовании кора активировалась через угловой койл, обеспечивающий большую фокусировку возбуждения, чем плоский одинарный койл, используемый при МС спинного мозга [21].

Известно, что изучение психофизиологических особенностей регуляции целенаправленной деятельности проводится не только в контексте влияния индивидуально-типологических особенностей НС, эмоций и ФС, но и основ ее когнитивных составляющих [11–16]. В связи с этим, далее на основании результатов собственного психофизиологического исследования, а также имеющихся литературных сведений мы провели ана-

лиз и обсуждение моторно-когнитивных реакций у спортсменов разных специализаций.

Установлено, что ВПЗМР у баскетболистов и спринтеров было достоверно меньше (соответственно, на 2.78 и 3.25%), т.е. выше скорость простой реакции, чем у стайеров (табл. 4). Следовательно, у баскетболистов и бегунов на короткие дистанции выявлен более высокий уровень скоростных свойств НС (лабильности – скорости протекания возбуждения и подвижности – смены возбуждения на торможение и наоборот). При этом не выявлено существенных различий ($p > 0.05$) между КТ Уиппла ПЗМР у спортсменов всех групп.

Для ситуационных видов спорта и, в частности, баскетбола характерны проявления сложных реакций, таких как реакция выбора (когда из нескольких возможных действий требуется мгновенно выбрать одно, наиболее адекватное данной ситуации), реакция на движущийся объект (мяч, партнер), реакция антиципации (реакция предвидения хода событий) и др. Для результативной работы представителей легкоатлетического бега, особенно на короткие дистанции, также очень важно развитие скоростных качеств (быстроты реакции, частоты шагов, быстроты начала движений и набора скорости). В связи с этим, с приме-

нением методик “РВ”, “РР”, “РДО” мы изучили особенности сенсомоторного реагирования баскетболистов, спринтеров и стайеров (табл. 4).

Установлено, что наименьшее время сложных сенсомоторных РВ и РР регистрировалось у спринтеров, по сравнению с которыми у баскетболистов оно было статистически значимо выше, но достоверно ниже, чем у стайеров (табл. 4). Следовательно, самая высокая скорость сложных сенсомоторных реакций характерна для спринтеров, несколько меньшая — для баскетболистов, а наименьшая — для стайеров, что согласуется с показателями ВПЗМР. Вместе с тем, КТ Уиппла сложных реакций у баскетболистов и спринтеров был значительно ниже, т.е. выше точность выполняемых заданий, чем у стайеров.

Следует отметить, что само время реакции (ПЗМР, РР, РВ) — это интегративная информация, имеющая надежные нейроструктурные и нейрофизиологические корреляты со сложившимися научными парадигмами под каждой из этих реакций. Например, ПЗМР просто отражает время детекции сигнала (*signal detection time*), РР — парадигму “Go/NoGo”, т.е. способность затормозить нежелательное действие при предъявлении стимула “ненужного” цвета (по сути — это время, требуемое для внимания), РВ — парадигму “принятия решения”. При этом когнитивная нагрузка у этих тестов разная: у РВ — наибольшая, затем РР, наименьшая — у ПЗМР [11–16]. В результате собственных исследований установлено, что у баскетболистов и спринтеров, имеющих существенные различия в показателях длины тела и руки (табл. 1), не выявлено достоверно значимых отличий в величинах ВПЗМР ($p > 0.05$) (табл. 4). В свою очередь, у баскетболистов время ПЗМР, РР, РВ было значительно меньше, а данные соматометрические показатели больше, чем у стайеров (табл. 1, 4). Такие данные могут указывать на отсутствие связи между длиной тела, конечностей и временем реакции, что согласуется с исследованиями других авторов [22, 23].

Отметим, что при проведении нами тестирования на время реакций (ПЗМР, РР, РВ) приоритетным являлась не столько точность, сколько быстрота реагирования на световые сигналы, что также совпадает с условием скорости, предлагаемым другими авторами в своих исследованиях [11, 16]. При этом нами оценивались не только быстрота реакции, но и степень точности выполнения заданий и устойчивости внимания, обусловленного силой и уравновешенностью нервных процессов, по КТ Уиппла. Учитывая феномен “*speed-accuracy tradeoff* (SAT)”, т.е., чем быстрее время, тем меньше точность, и наоборот [24], мы допускаем, что выполнение спортсменами тестовых заданий на быстроту реакций сопровождается уменьшением временных характери-

стик, но снижением степени точности простой и сложной сенсомоторных реакций. Это согласуется с выводами в работе *G. Dutilh et al.* [25]. При этом исследования *N.R. Arnold et al.* [26] не выявили разницы во времени принятия решения между условиями скорости и точности, а *V. Lerche, A. Voss* [24] в своей работе отмечают, что влияние манипуляций со скоростью и точностью на каждый из этих параметров связано с различиями в соответствующих когнитивных процессах. Н.Е. Свицерская и др. [27] установили, что продуктивное и качественное выполнение задания сопровождается усилением информационной активности левого полушария, преимущественно в затылочно-теменных областях и частично передне-лобных отделах. Скоростная же стратегия оперативного выполнения задания обуславливается переходом зоны информационной активности в передне-лобные отделы исключительно правого полушария [27].

Целый ряд литературных сведений свидетельствует о том, что время простых и сложных сенсомоторных реакций является одним из показателей уровня интеллекта человека. Отмечается, что чем выше скорость реагирования, тем выше показатели интеллекта [11–15, 28, 29]. *D.L. Woods et al.* [11] выявили тесную взаимосвязь между уменьшением времени простой реакции и высоким уровнем интеллекта. К реакциям, имеющим высокую корреляцию с уровнем развития интеллекта, относятся реакции выбора из двух и более альтернатив [29, 30]. Выработка стратегии деятельности представляет собой процесс планирования, когда индивид совершает выбор из числа известных ему способов решения стоящей перед ним задачи или изобретает новый, ранее ему неизвестный путь. Например, исследования мозговой организации выработки стратегии принятия решения при выполнении задачи простого выбора между двумя стимулами, проведенные *T.A. Hare et al.* [29], показали, что сначала сигналы значения стимула обрабатываются в вентральной медиальной префронтальной коре, затем они передаются в области дорсомедиальной префронтальной коры и внутритеменной борозды, реализуя процесс сравнения, а выходные данные областей сравнения модулируют активность моторной коры для реализации выбора. В работе [30] выработка стратегии решения когнитивной задачи исследовалась на модели принятия решений в ситуации неопределенности. В результате выявлена локализация фокусов взаимодействия в лобных полюсных областях и интеграция этих фронтальных зон с переднеассоциативными и височными отделами коры левого полушария, а также с теменными и затылочными зонами обоих полушарий. Следует отметить нейрофизиологические исследования М.В. Славуцкой и др. [16], в результате которых обнаружено включение фронто-

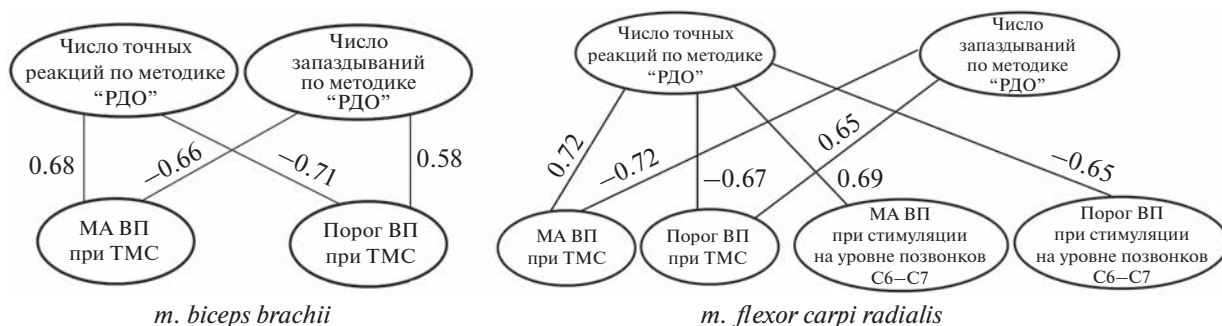


Рис. 1. Графики корреляции нейро- и психофизиологических параметров у баскетболистов.

теменных сетей внимания и саккадического контроля, заключающегося в быстрых, строго согласованных движениях глаз, происходящих одновременно и в одном направлении, в подготовке ответа в парадигме "Go/NoGo". С учетом вышеизложенного и результатов собственных исследований, свидетельствующих о более высокой скорости простой и сложной сенсомоторных реакций у спринтеров и баскетболистов по сравнению со стайерами, можно заключить, что отличия в проявлениях возможностей зрительно-моторных и когнитивных функций по показателям времени ПЗМР, РР, РВ связаны со спецификой вида спорта, и такие возможности более выражены у спортсменов, тренирующих скорость и координацию, и менее — у спортсменов, развивающих выносливость. Такие результаты и выводы согласуются с рабочей гипотезой нашего исследования.

Тест "РДО" используется для изучения способности к пространственно-временному предвидению, являющийся важным и определяющим фактором успешной спортивной специализации в различных видах спорта. В результате анализа значений с применением методики "РДО" было установлено, что у спортсменов наибольшим являлось число точных реакций, число опережений незначительно преобладало над числом запаздываний (в группе баскетболистов, $p > 0.05$) или данные показатели практически сопоставимы между собой (в группах спринтеров и стайеров, $p > 0.05$) (табл. 4). Такие данные свидетельствуют о том, что у представителей данных видов спорта диагностируется уравновешенность нервных процессов. Межгрупповое сравнение выявило самое высокое число точных реакций у баскетболистов, у которых отмечалось меньшее число запаздываний и опережений в сравнении с другими спортсменами, тогда как у стайеров обнаружены диаметрально противоположные характеристики (табл. 4). Следовательно, среди всех обследованных спортсменов самой высокой способностью предвидения хода событий обладали баскетболисты. Это вполне объяснимо, так как предвидение

возможных передвижений соперника очень важно в ситуационных видах спорта, что позволяет своевременно подготовить и обеспечить точность ответных действий.

Выше отмечалось, что международным аналогом теста "РДО" является реакция на перехват цели. Ряд исследований позволил установить, что сенсомоторные преобразования, участвующие в задаче перехвата цели, включают лобно-теменно-затылочную систему. Решение пространственных задач с высокой точностью сопровождается локализацией фокусов мозговой активности в правой лобной области, активацией правых теменных и затылочных областей [14, 31]. Литературные сведения и обнаруженная у баскетболистов наибольшая точность реакций при выполнении теста "РДО" могут указывать на более высокую активность данных мозговых структур у игроков в сравнении со спринтерами и стайерами.

Оценка связи параметров ВП мышц с психофизиологическими характеристиками, зарегистрированными у баскетболистов, позволила выявить ряд корреляционных взаимосвязей (значимы при $p < 0.05$; $p < 0.01$), представленных на рис. 1. Полученные корреляции преимущественно средней силы связи свидетельствуют о том, что уровень возбудимости двигательных нейронов коры ГМ и мотонейронов спинного мозга, контролирующих активность мышц плеча и предплечья, положительно коррелирует с точностью реакций, устойчивостью внимания, обусловленного силой и уравновешенностью нервных процессов, и отрицательно — с числом запаздываний.

У спринтеров и стайеров выявлен другой ряд корреляционных плеяд ($p < 0.05$; $p < 0.01$) (рис. 2, 3), которые указывают на отрицательную взаимосвязь возбудимости двигательных зон коры ГМ для мышц верхних и нижних конечностей со скоростными свойствами НС, оцениваемыми по времени сенсомоторных реакций (простой и сложной) и показателям проводящей способности КСТ (ЛП ВП мышц, ВЦМП). Такие взаимосвязи, во-первых, согласуются с результатами первой серии наших исследований и, во-вторых,

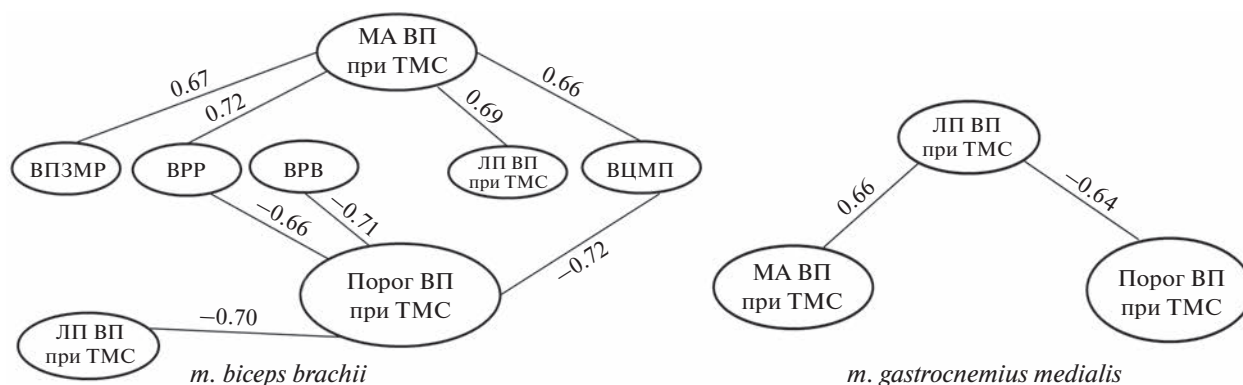


Рис. 2. Графики корреляции нейро- и психофизиологических параметров у спринтеров.

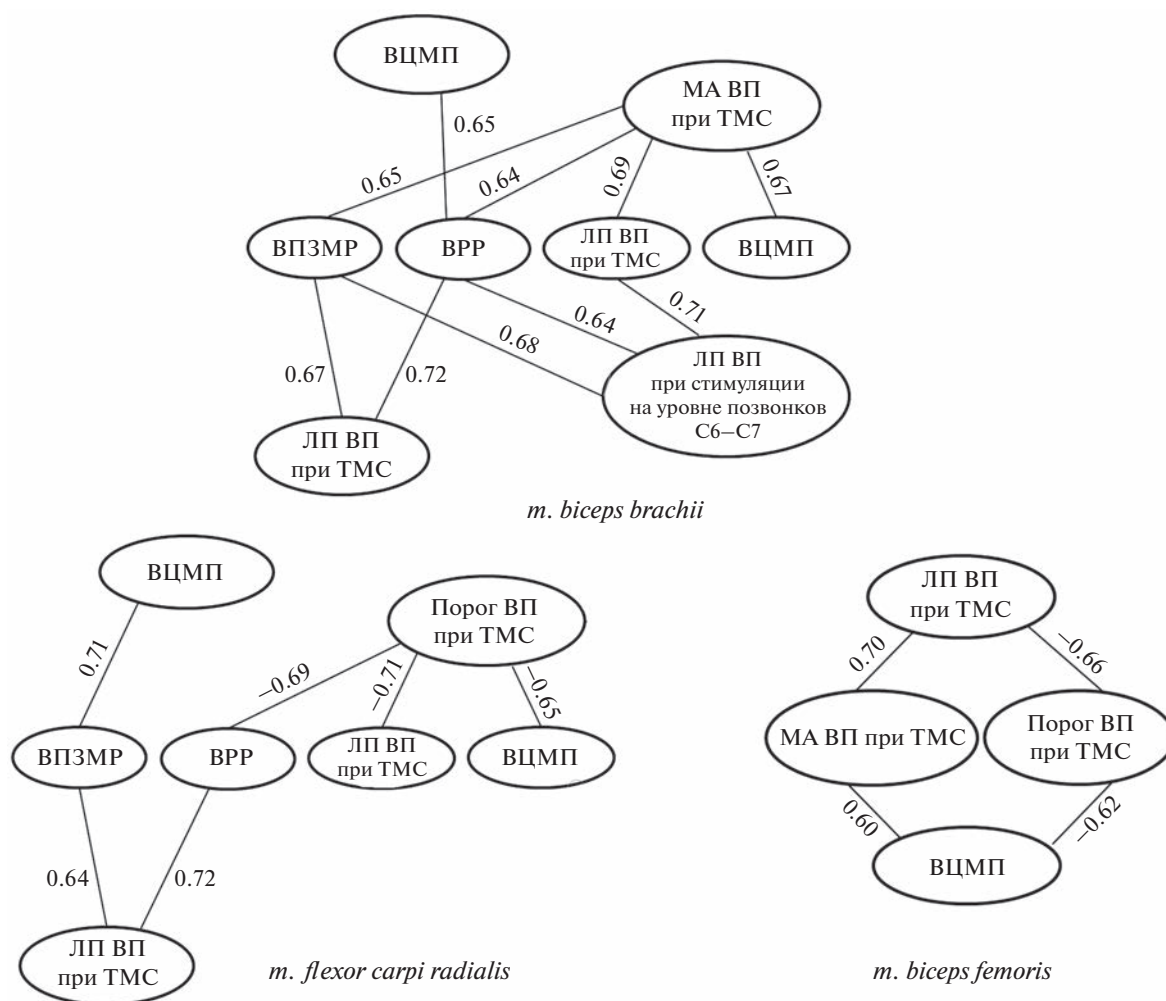


Рис. 3. Графики корреляции нейро- и психофизиологических параметров у стайеров.

показывают, что повышение возбудимости КСТ может сопровождаться увеличением временных характеристик когнитивного компонента двигательных действий спортсменов циклических ви-

дов спорта, т.е. снижением успешности когнитивной деятельности, и наоборот.

В заключении следует отметить широко известный факт, что представители игровых, цик-

лических и других видов спорта отличаются характеристиками НС, композицией МВ, характером энергообеспечения, и эти отличия генетически детерминированы [5, 6, 32, 33]. Но, наряду с генотипическими исследованиями, выраженный интерес сосредотачивается на изучении возможных нейронных изменений и адаптационных механизмов в двигательной системе спортсменов, вызванных различными видами двигательной деятельности [1, 2, 20]. В нашем исследовании участвовали спортсмены, имеющие стаж спортивной деятельности не менее 10 лет, поэтому особенности нейро- и психофизиологических характеристик могут быть связаны со спецификой спортивной деятельности. При этом влияние генетического фактора также не исключается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты исследования подтвердили ранее выдвинутую гипотезу о том, что для представителей разных видов спорта будут характерны отличительные особенности ФС КСТ и моторно-когнитивных реакций. Среди обследованных групп спортсменов у легкоатлетов, специализирующихся в беге на 5000 м и выполняющих длительную циклическую работу на выносливость в режиме большой мощности, регистрировалась самая высокая корково-спинальная возбудимость, которая у стайеров и спринтеров отрицательно коррелировала со скоростными свойствами НС. Легкоатлеты-бегуны на 100 м, адаптированные к непродолжительной циклической работе максимальной мощности и требующей развития скоростных способностей, и баскетболисты, деятельность которых сопряжена с выполнением скоростно-силовых нагрузок переменной мощности с преимущественно ациклической структурой движений для приоритетного развития скоростных, координационных способностей и вестибулярной устойчивости, отличаются от стайеров большей проводящей способностью КСТ и скоростью простой и сложной сенсомоторных реакций. В сравнении с другими спортсменами у баскетболистов выявлена самая высокая точность сложных сенсомоторных реакций, которая положительно коррелировала с возбудимостью КСТ и наряду со скоростью сенсомоторных реакций служит показателем успешности когнитивной деятельности. Факты, полученные в результате проведенного исследования, в том числе корреляционного анализа, можно объяснить схожестью механизмов формирования ВП в результате МС кортико-спинальных структур и реакций в ходе психофизиологического тестирования.

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

и одобрены локальным этическим комитетом Великолукской государственной академии физической культуры и спорта (Великие Луки).

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clos P., Lepers R., Garnier Y.M. et al. Locomotor activities as a way of inducing neuroplasticity: insights from conventional approaches and perspectives on eccentric exercises // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2021. V. 121. № 3. P. 697.
2. Ланская О.В., Ланская Е.В. Физиологические механизмы пластичности моторной системы при занятиях различными видами спорта // *Ульяновский медико-биологический журнал.* 2018. № 4. С. 73.
3. Moscatelli F., Messina A., Valenzano A. et al. Transcranial magnetic stimulation as a tool to investigate motor cortex excitability in sport // *Brain Sci.* 2021. V. 11. № 4. P. 432.
4. Lockyer E.J., Nippard A.P., Kean K. et al. Corticospinal excitability to the biceps brachii is not different when arm cycling at a self-selected or fixed cadence // *Brain Sci.* 2019. V. 9. № 2. P. 41.
5. Сологуб Е.Б., Таймазов В.А., Афанасьева И.А. Спортивная генетика: монография. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2017. 166 с.
6. Фудин Н.А., Хадарцев А.А., Орлов В.А. Медико-биологические технологии в физической культуре и спорте: монография / Под ред. акад. РАН Григорьева А.И. М.: Спорт, Человек, 2018. 320 с.
7. Городничев Р.М., Шляхтов В.Н. Физиология силы: монография. М.: Спорт, 2016. 232 с.
8. Isaychev S.A., Chernorizov A.M., Korolev A.D. et al. The psychophysiological diagnostics of the functional state of the athlete. Preliminary data // *Psychology in Russia: State of the Art.* 2012. № 5. P. 244.
9. Луткова Н.В., Макаров Ю.М., Минкин В.А. и др. Показатели психофизиологического состояния спортсменов-игроков в ситуациях с различной психоэмоциональной напряженностью // *Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта.* 2019. Т. 12. № 178. С. 163.
10. Ланская О.В., Сазонова Л.А., Лысов А.Д. Влияние тренировочных занятий реабилитационной направленности на психофизиологические функции спортсменов с травмами костно-мышечной системы // *Адаптивная физическая культура.* 2020. Т. 1. № 81. С. 43.
11. Woods D.L., Wyta J.M., Yund E.W. et al. Factors influencing the latency of simple reaction time // *Front. Hum. Neurosci.* 2015. V. 9. P. 131.

12. *Dunovan K., Vich C., Clapp M. et al.* Reward-driven changes in striatal pathway competition shape evidence evaluation in decision-making // *PLoS Comput. Biol.* 2019. V. 6. № 15. P. 5.
13. *Redfern M.S., Chambers A.J., Jennings J.R., Furman J.M.* Sensory and motoric influences on attention dynamics during standing balance recovery in young and older adults // *Exp. Brain Res.* 2017. V. 235. № 8. P. 2523.
14. *Merchant H., Zarco W., Prado L., Pérez O.* Behavioral and neurophysiological aspects of target interception // *Adv. Exp. Med. Biol.* 2009. V. 629. P. 201.
15. *Irwin W.S.* Simple reaction time: It is not what it used to be Reviewed work(s) // *Am. J. Psychol.* 2010. V. 123. № 1. P. 39.
16. *Славуцкая М.В., Карелин С.А., Котенев А.В.* Негативные компоненты зрительных вызванных ответов в саккадической парадигме “GO/NOGO” у “быстрых” и “медленных” испытуемых // *Физиология человека.* 2022. Т. 48. № 1. С. 69.
Slavutskaya M.V., Karelin S.A., Kotenev A.V. Negative components of visual evoked responses in the “GO/NOGO” saccadic paradigm in “fast” and “slow” subjects // *Human Physiology.* 2022. V. 48. № 1. P. 56.
17. *Мантрова И.Н.* Методическое руководство по психофизиологической и психологической диагностике. Иваново: Нейрософт, 2007. С. 20.
18. *Green H.J., Daub B., Houston M.E. et al.* Human vastus lateralis and gastrocnemius muscles. A comparative histochemical and biochemical analysis // *J. Neurol. Sci.* 1981. V. 52. № 2–3. P. 201.
19. *Dongés S.C., Taylor J.L., Nuzzo J.L.* Elbow angle modulates corticospinal excitability to the resting biceps brachii at both spinal and supraspinal levels // *Exp. Physiol.* 2019. V. 104. № 4. P. 546.
20. *Челноков А.А., Гладченко Д.А., Буцацкая И.Н., Пивоварова Е.А.* Функциональные особенности спинального торможения у спортсменов разных видов спорта // *Вестник Тверского государственного университета. Серия “Биология и экология”.* 2019. Т. 3. № 55. С. 35.
21. *Trompetto C., Assini A., Buccolieri A. et al.* Intracortical inhibition after paired transcranial magnetic stimulation depends on the current flow direction // *Clin. Neurophysiol.* 1999. V. 110. № 6. P. 1106.
22. *Kilburn K.H., Thornton J.C., Hanscom B.* Population-based prediction equations for neurobehavioral tests // *Arch. Environ. Health.* 1998. V. 53. № 4. P. 257.
23. *Anstey K.J., Dear K., Christensen H., Jorm A.F.* Biomarkers, health, lifestyle, and demographic variables as correlates of reaction time performance in early, middle, and late adult // *Q. J. Exp. Psychol. A.* 2005. V. 58. № 1. P. 5.
24. *Lerche V., Voss A.* Speed-accuracy manipulations and diffusion modeling: Lack of discriminant validity of the manipulation or of the parameter estimates? // *Behav. Res. Methods.* 2018. V. 50. № 6. P. 2568.
25. *Dutilh G., Annis J., Brown S.D. et al.* The quality of response time data inference: A blinded, collaborative assessment of the validity of cognitive models // *Psychon. Bull. Rev.* 2019. V. 26. № 4. P. 1051.
26. *Arnold N.R., Bröder A., Bayen U.J.* Empirical validation of the diffusion model for recognition memory and a comparison of parameter-estimation methods // *Psychol. Res.* 2015. V. 79. № 5. P. 882.
27. *Свидерская Н.Е., Таратынова Г.В., Кожедуб Р.Г.* ЭЭГ-корреляты изменения стратегии переработки информации при зрительном воображении // *Журн. высш. нерв. деят. им. И.П. Павлова.* 2005. Т. 55. № 5. С. 624.
28. *Woodley M.A., Nijenhuis T., Murphy R.* Were the Victorians cleverer than us? The decline in general intelligence estimated from a metaanalysis of the slowing of simple reaction time // *Intelligence.* 2013. V. 41. P. 843.
29. *Hare T.A., Schultz W., Camerera C.F. et al.* Transformation of stimulus value signals into motor commands during simple choice // *PNAS.* 2011. V. 108. № 44. P. 18120.
30. *Кошельков Д.А., Мачинская Р.И.* Функциональное взаимодействие корковых зон в процессе выработки стратегии когнитивной деятельности. Анализ когерентности θ -ритма ЭЭГ // *Физиология человека.* 2010. Т. 36. № 6. С. 55.
Koshelkov D.A., Machinskaya R.I. Functional coupling of cortical areas during problem solving task: Analysis of θ rhythm coherence // *Human Physiology.* 2010. V. 36. № 6. P. 665.
31. *Merchant H., Georgopoulos A.P.* Neurophysiology of perceptual and motor aspects of interception // *J. Neurophysiol.* 2006. V. 95. № 1. P. 1.
32. *Ахметов И.И., Аксенов М.О., Аверясова Ю.О., Ализар Т.А.* Генетический контроль развития скоростно-силовой выносливости гандболистов // *Культура физическая и здоровье.* 2021. Т. 3. № 79. С. 97.
33. *Семенова Е.А., Хабибова С.А., Борисов О.В. и др.* Вариативность структуры ДНК и состав мышечных волокон человека // *Физиология человека.* 2019. Т. 45. № 2. С. 128.
Semenova E.A., Khabibova S.A., Borisov O.V. et al. The variability of DNA structure and muscles-fiber composition // *Human Physiology.* 2019. V. 45. № 2. P. 225.

Functional State of the Cortical-Spinal Tract and Motor-Cognitive Reactions of Athletes Who Train Speed, Endurance and Coordination of Movement

O. V. Lanskaya^a, *, E. V. Lanskaya^a

^aVelikie Luki State Academy of Physical Culture and Sports, Velikie Luki, Russia

*E-mail: lanskaya2012@yandex.ru

The aim of the work was to study the cortical-spinal excitability and conducting ability of the motor system using muscle potentials caused by magnetic stimulation of the motor cortex of the brain and spinal segments

at the level of the C6–C7 and T12–L1 vertebrae in athletes of different specializations, and to correlate these parameters with psychophysiological characteristics. The researches revealed: 1) the stayers had the highest level of excitability of cortical neurons and motor neurons of the cervical and lumbar thickenings of the spinal cord, controlling the activity of shoulder, forearm, hip and shin muscles; the sprinters had the lowest level, while that of the basketball players' was in between; 2) the sprinters and the basketball players displayed the highest conductive capacity of the corticospinal tract (CST), the stayers had the lowest one; 3) sprinters and basketball players had a higher rate of simple and complex sensorimotor reactions as an indicator of neuromotor (lability and mobility of the nervous system) and cognitive processes than stayers; 4) basketball players had the highest accuracy of complex sensorimotor reactions and the ability to anticipate the course of events as a sign of cognitive success than other athletes; 5) cortical-spinal excitability positively correlated with the accuracy of movements (in basketball players) and negatively with the conductive ability of the CST and the speed of simple and complex sensorimotor reactions (in sprinters and stayers). Athletes who train speed, endurance and coordination of movement have distinctive features and the relationship between the functional state of the CST and motor-cognitive reactions.

Keywords: athletes, magnetic stimulation, muscle evoked potentials, psychophysiological research, neuromotor and cognitive processes.