Дата публикации: 01.12.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_04_10
УДК 796.012.1; 612.83

Publication date: 01.12.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_04_10
UDC 796.012.1; 612.83

ВЛИЯНИЕ СЕАНСА ПАРНОЙ АССОЦИАТИВНОЙ СТИМУЛЯЦИИ С ОПЕРЕЖЕНИЕМ ПРИБЫТИЯ ТРАНСКРАНИАЛЬНОГО СТИМУЛА НА СКОРОСТНО-СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОИЗВОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

С.М. Иванов, Р.М. Городничев
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта», г. Великие Луки, Россия

Аннотация. ***Введение.*** В статье рассматриваются эффекты сеанса парной ассоциативной стимуляции моторной коры и спинного мозга с сопряжением возбуждающих потенциалов на уровне спинальных мотонейронов и опережением прибытия транскраниального магнитного стимула на 10 мс. Цель работы состояла в определении влияния сеанса парной ассоциативной стимуляции на скоростно-силовые характеристики максимального произвольного подошвенного сгибания стопы. ***Методы.*** В исследовании приняли участие 9 бегунов на короткие и средние дистанции. Участники исследования выполняли максимальное подошвенное сгибание стопы (в изометрическом режиме) на комплексе Biodex System 3. Выполнялись транскраниальная магнитная стимуляция моторной зоны коры головного мозга и чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга. ***Результаты.*** Сеанс парной ассоциативной стимуляции приводит к значительному повышению величины максимального произвольного изометрического усилия и усилия, развиваемого испытуемым за первые 100 мс движения, а также к уменьшению времени достижения максимального усилия и 50% от него. Такие изменения могут быть объяснены зарегистрированным увеличением амплитуды и частоты турнов электромиограмм рабочих мышц в фазе напряжения при выполнении усилия. ***Заключение.*** Сеанс стимуляции, состоящий из 100 пар стимулов, может быть использован в качестве дополнительного средства при развитии скоростно-силовых свойств двигательной системы человека.

Ключевые слова: парная ассоциативная стимуляция, скоростно-силовые качества, транскраниальная магнитная стимуляция, стимуляция спинного мозга.

THE EFFECT OF PAIRED ASSOCIATIVE STIMULATION WITH A TRANSCRANIAL STIMULUS ADVANCE ARRIVAL ON THE HUMAN'S VOLUNTARY CONTRACTION SPEED-STRENGTH CHARACTERISTICS

S.M. Ivanov, R.M. Gorodnichev
Velikiye Luki State Academy of Physical Education and Sports, Velikiye Luki, Russia

Abstract. ***Introduction.*** The article shows the effect of a session of paired associative stimulation of the motor cortex and spinal cord, targeted to the spinal motor neurons and with arrival of a transcranial magnetic stimulus by 10 ms before the spinal one. The aim of the study was to determine the functional effect of the stimulation session on the speed-strength characteristics of the maximum voluntary plantar flexion. ***Methods.*** The study involved 9 short- and medium-distance runners. The participants performed maximum voluntary plantar flexion (isometric mode) on the Biodex System 3 complex. We conducted transcranial magnetic stimulation of the motor cortex and percutaneous electrical stimulation of the spinal cord roots at L2-L3 level. ***Results.*** The stimulation session led to a significant increase of the maximum voluntary isometric contraction and the effort developed by the subject during the first 100 ms of movement, as well as to a decrease in the time to achieve the maximal contraction and 50% of it. These changes can be explained by the working muscles electromyogram's amplitude and frequency increasing at the force developing phase when performing the maximal contraction. ***Conclusion.*** The paired associative stimulation session, consisting of 100 pairs of stimuli, can be used as an additional tool for developing of the human speed-strength abilities.

Keywords: paired associative stimulation, speed-strength abilities, transcranial magnetic stimulation, spinal cord stimulation.

Введение. Интерес к исследованию способов целенаправленного изменения функциональных связей головного и спинного мозга существенно возрос в последние годы после того, как были получены экспериментальные доказательства возможности применения метода парной ассоциативной стимуляции (ПАС) для улучшения двигательной реабилитации после приобретенных повреждений головного мозга, таких как инсульт [1], а также повреждений спинного мозга [2-6]. Метод ПАС предусматривает повторное сопряжение процессов возбуждения в корковых нейронах или в нейронах спинного мозга, вызываемых одиночными магнитными стимулами моторной коры и электрическим воздействием на периферический нерв [5] или на задние корешки спинного мозга [3, 7]. При этом регуляция сопряжения процессов возбуждения на корковых мотонейронах либо на уровне спинальных мотонейронов достигается за счет регуляции интервала между магнитным и электрическим стимулами, длительность которого подбирается индивидуально для каждого испытуемого на основе разницы в латентности моторных ответов на стимуляцию исследуемых нейрональных структур.

К настоящему времени получены данные о зависимости эффектов ПАС от последовательности поступления магнитных и электрических стимулов на целевые мотонейроны и временного интервала между ними. Так, в работе Фельдмана (2012 г.) показано, что время возникновения спайка наряду с некоторыми другими параметрами стимуляции (частоты возбуждения, постсинаптического напряжения) является важным условием формирования долговременной потенциации целевых нейронов [8]. В публикации A. Shulga с соавторами (2015) экспериментально доказано, что 20-минутная ПАС с одновременным поступлением вызываемых магнитным и электрическим стимулами процессов возбуждения на спинальные мотонейроны приводит к повышению кортикоспинальной возбудимости [9]. В то же время, при использовании ПАС, когда афферентный импульс поступал к спинальным мотонейронам за 5 мс до кортикоспинального импульса, изменение возбудимости не отмечалось [7].

Ранее нами была показана принципиальная возможность использования ПАС с одновременным поступлением возбуждающих сигналов к спинальным мотонейронам для повышения скоростно-силовых характеристик максимального произвольного сокращения (МПС) на примере подошвенного сгибания стопы. Было зарегистрировано увеличение скорости достижения максимальной силы и скорости расслабления после выполнения МПС под воздействием ПАС [10]. В недавно проведенных экспериментах нами показана зависимость кортикоспинальной возбудимости от внутристимульного интервала ПАС, последовательности поступления стимулов, составляющих пару, и интенсивности магнитного стимула. В процессе этого исследования было установлено, что наиболее эффективные параметры стимуляции с точки зрения повышения кортикоспинальной возбудимости мотонейронов мышц-сгибателей голени посредством ПАС обеспечиваются использованием надпорогового уровня стимула транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) при условии его поступления к спинальным мотонейронам на 10 мс раньше импульса, наносимого на спинной мозг ($ПАС_{10}$) [11]. В связи с вышеизложенным цель данного исследования состояла в выявлении эффекта сеанса $ПАС_{10}$ на скоростно-силовые характеристики максимального произвольного движения человека.

Методы и организация исследования. Исследование проведено на базе Научно-исследовательского института проблем спорта и оздоровительной физической культуры Великолукской государственной академии физической культуры и спорта (ФГБОУ ВО ВЛГАФК) на 9 практически здоровых спортсменах в возрасте от 18 до 25 лет, квалификации от III разряда до кандидатов в мастера спорта, специализирующихся в беге на короткие и средние дистанции. Испытуемые подписали письменное информированное согласие на участие в экспериментах. Протокол исследования был одобрен комиссией по этике исследований ФГБОУ ВО ВЛГАФК.

Протокол исследования предусматривал однократное посещение лаборатории. Все исследования проводились в утреннее время, испытуемые накануне не подвергались большим нагрузкам. Участники исследования выполняли максимальное подошвенное сгибание стопы (в изометрическом режиме) на комплексе Biodex System 3. Испытуемый располагался в кресле Biodex, согласно инструкции комплекса, при измерении силы подошвенного сгибания стопы. Участник выполнял три тестовые попытки с паузой отдыха 30 секунд между ними в каждом из экспериментальных условий (до ПАС, непосредственно после ПАС, спустя 5 и 10 минут после завершения ПАС). Методика регистрации скоростно-силовых параметров тестового движения была идентична предыдущим исследованиям [10]. Оценивали МПС, величину усилий, развиваемых спортсменом в первые 50, 100, 150 и 200 мс тестового движения, а также скорость достижения максимальной силы и 50% от максимума, скорость полурасслабления (снижение усилия до уровня 50% от МПС).

В процессе реализации МПС регистрировали электромиограмму (ЭМГ) мышц голени – передней большеберцовой (ТА), медиальной икроножной (GM) и камбаловидной (Sol) посредством 8-канального электромиографа «Нейро-МВП 8» (ООО «Нейрософт», Россия). Анализировали амплитуду и частоту турнов ЭМГ в процессе всего тестового движения, а также отдельно в фазе развития напряжения и расслабления.

ТМС моторной зоны коры головного мозга и чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга (ЧЭССМ) осуществлялись по той же методике, что и в предыдущей серии экспериментов [10].

Сеанс ПАС включал нанесение испытуемому 100 пар стимулов в течение 800 секунд. Каждая пара состояла из подающегося первым на кортикальную моторную зону одиночного стимула ТМС амплитудой 110% от моторного порога (МП) GM и подаваемого с определенной временной задержкой относительно ТМС одиночного стимула ЧЭССМ амплитудой 130% от МП GM. Расчет интервала между стимулами ТМС и ЧЭССМ в паре производился индивидуально для каждого участника путем вычитания длительности латентного периода ответов, вызванных тестовым стимулом ЧЭССМ из латентности вызванных моторных ответов (ВМО) при ТМС и прибавления к полученной величине 10 мс. Интервал между двумя стимулами в каждой паре ПАС, как и интервал между парами стимулов, контролировались разработанным нами прибором [12]. Данный прибор осуществлял запуск магнитного и электрического стимуляторов.

Математико-статистическая обработка данных включала расчет среднего арифметического значения (M), стандартной ошибки среднего (m) и стандартного отклонения (σ). Для оценки выраженности изменений исследуемых показателей рассчитывалось их процентное соотношение в различных экспериментальных условиях. Статистическая значимость различий данных, полученных до и после стимуляционного воздействия, определялась с помощью дисперсионного анализа (ANOVA) с последующим апостериорным анализом по критерию Фишера при уровне значимости $p<0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ результатов показал, что исследуемые параметры произвольного максимального подошвенного сгибания стопы подверглись значительным изменениям под воздействием сеанса $ПАС_{10}$. Так, величина МПС непосредственно после стимуляции возросла на 8%, а к 10 минуте отдыха увеличение составляло 9%. Усилие, развиваемое спортсменом за первые 100 мс тестового движения, достоверно увеличилось под воздействием $ПАС_{10}$ на 42% с 26,9 Нм до 38,25 Нм к 5 минуте отдыха. Тенденция к увеличению развиваемого усилия отмечалась и в остальных исследуемых временных интервалах (рис.).

Время достижения исходной МПС достоверно сокращалось относительно фоновых значений во всех экспериментальных условиях (табл. 1). Так, непосредственно после сеанса $ПАС_{10}$ зарегистрировано сокращение времени достижения МПС относительно фона на 32%, а через 5 и 10 минут отдыха – на 43% и 36% соответственно. Время достижения 50% от МПС также достоверно сокращалось после сеанса $ПАС_{10}$. Наибольшее снижение зарегистрировано по

завершению 5 минуты отдыха – на 21% (табл. 1).

Длительность полного расслабления после сеанса ПАС$_{10}$ изменялась недостоверно. Однако, стоит отметить, что в некоторых экспериментальных условиях зарегистрирована тенденция к увеличению времени полного расслабления и полурасслабления после сеанса ПАС$_{10}$. Так, после 10 минут отдыха время полурасслабления возросло на 20%. Тем не менее, время расслабления с усилия в 50% от максимума во всех экспериментальных условиях имело тенденцию к сокращению: на 5,5%, 1,8% и 15% сразу после сеанса ПАС$_{10}$, через 5 и 10 минут соответственно (табл. 1).

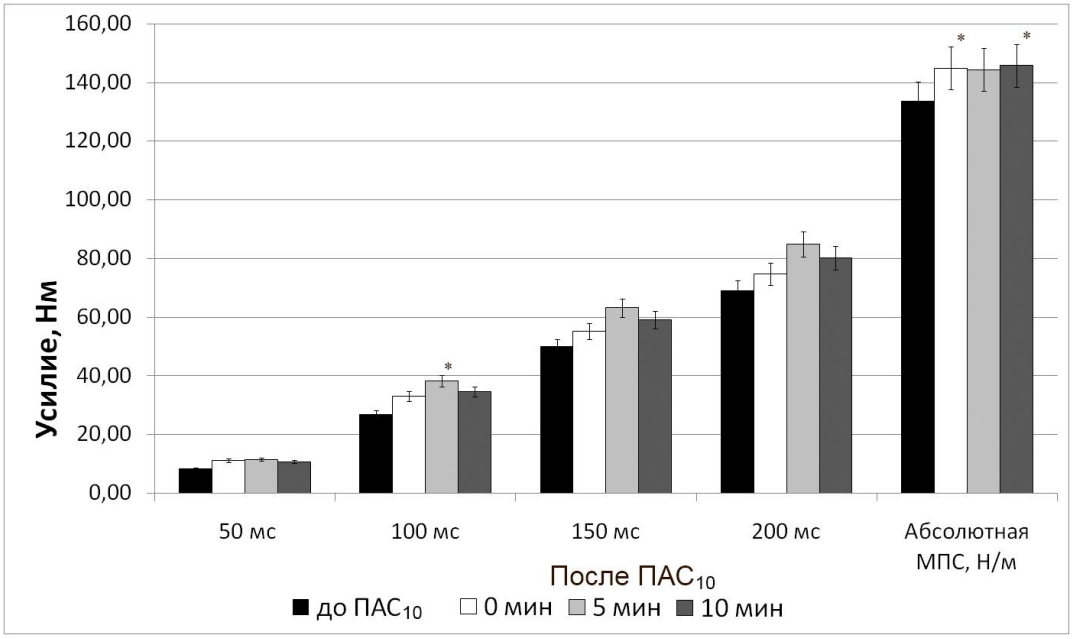


Рис. Динамика усилия, развиваемого за первые 50, 100, 150 и 200 мс выполнения максимального подошвенного сгибания стопы, при воздействии сеанса ПАС$_{10}$

Примечание: * – статистически значимые изменения относительно фоновой величины ($p<0,05$); ПАС$_{10}$ – прибытие транскраниального магнитного стимула на 10 мс.

Под воздействием сеанса ПАС$_{10}$ изменились и электромиографические характеристики мышечной активности при выполнении тестового движения. В фазе развития напряжения амплитуда турнов GM достоверно увеличивалась во всех экспериментальных условиях в сравнении с фоном на 42,84%, 34,01% и 34,42% соответственно сразу после сеанса ПАС, через 5 и 10 минут (табл. 2).

Таблица 1

Параметры МПС при изометрическом максимальном подошвенном сгибании стопы до воздействия сеанса ПАС$_{10}$ и через 0, 5, 10 минут после его завершения, M±m

Параметр МПС	Время, мс			
	До ПАС$_{10}$ (фон)	0 мин	5 мин	10 мин
Достижение МПС	825,00±39	555,83±21*	468,33±33*	525,00±28*
Достижение 50% от МПС	200,83±23	168,33±34	157,50±19*	174,17±27
Расслабление	551,67±29	578,33±41	610,0±32	561,67±31
Полурасслабление	193,33±27	206,67±21	184,17±28	233,33±28
Расслабление с 50% от МПС	361,67±36	341,67±26	355,00±23	307,50±34

Примечание: МПС – максимальное произвольное изометрическое усилие; ПАС$_{10}$ – прибытие транскраниального магнитного стимула на 10 мс; * – статистически значимые изменения относительно фонового показателя ($p<0,05$).

Таблица 2

Средняя амплитуда ЭМГ при выполнении максимального подошвенного сгибания стопы, M±m

Экспериментальное условие	Средняя амплитуда турнов ЭМГ, мкВ					
	Напряжение			Расслабление		
	TA	GM	Sol	TA	GM	Sol
До $ПАС_{10}$	130±7	292±42	493±60	128±16	180±16	217±18
0 мин	183±35*	417±60*	588±81*	210±58*	249±46*	207±22
5 мин	176±35*	391±58*	525±85	218±52*	246±37*	198±15
10 мин	180±37*	393±55*	513±82	171±38*	234±26*	216±30

Примечание: * – статистически значимые изменения относительно фона (p<0,05); ЭМГ – электромиография; $ПАС_{10}$ – прибытие транскраниального магнитного стимула на 10 мс; TA – передняя большеберцовая мышца; GM – медиальная икроножная мышца; Sol – камбаловидная мышца.

Амплитуда GM и TA достоверно возросла относительно фона в фазе расслабления на 38,57% и 64,3% соответственно (табл. 2). Тенденция к увеличению средней амплитуды турнов зарегистрирована у всех мышц практически во всех экспериментальных условиях в сравнении с фоновыми показателями за исключением камбаловидной мышцы в фазе расслабления, у которой установлена тенденция к небольшому снижению средней амплитуды турнов.

Средняя частота турнов ЭМГ в процессе выполнения тестового движения после нанесения сеанса ПАС10 изменялась достоверно в нескольких случаях. Такие изменения наблюдались у TA сразу после сеанса ПАС10 и через 10 минут отдыха (табл. 2). У GM частота турнов ЭМГ увеличилась на 15,53% в фазе напряжения на 5 минуте отдыха в обеих представленных фазах движения. У мышцы Sol наблюдалось снижение частоты турнов к 10 минуте отдыха относительно фона (табл. 3). Следует отметить тенденцию к увеличению средней частоты турнов в подавляющем большинстве экспериментальных условий (табл. 3).

Зарегистрированные изменения можно объяснить укреплением кортикоспинальных синаптических связей нисходящих моторных путей и спинальных мотонейронов, поскольку, согласно предшествующим исследованиям, сеанс ПАС приводит к увеличению кортикоспинальной возбудимости, в то время как спинальная возбудимость значительным изменениям не подвергается [13].

Таблица 3

Средняя частота турнов ЭМГ при выполнении максимального подошвенного сгибания стопы, M±m

Экспериментальное условие	Средняя частота турнов ЭМГ, Т/с					
	Напряжение			Расслабление		
	TA	GM	Sol	TA	GM	Sol
До $ПАС_{10}$	173±22	308±41	205±27	224±29	400±61	282±25
0 мин	195±19*	331±39	212±20	274±37*	446±59	291±17
5 мин	186±20	346±29*	210±29	258±28	462±52*	270±27
10 мин	202±20*	324±43	191±23*	271±32*	441±54	244±22*

Примечание: * – статистически значимые изменения относительно фона (p<0,05); ЭМГ – электромиография; $ПАС_{10}$ – прибытие транскраниального магнитного стимула на 10 мс; TA – передняя большеберцовая мышца; GM – медиальная икроножная мышца; Sol – камбаловидная мышца.

Наблюдаемые эффекты воздействия сеанса $ПАС_{10}$, вероятно, реализуются посредством повышения частоты импульсации вовлекаемых в работу двигательных единиц (ДЕ) и рекрутированием большего числа быстрых высокопороговых ДЕ, о чем косвенно свидетельствует изменение частоты и значительное повышение амплитуды турнов ЭМГ рабочих мышц во время выполнения максимального усилия после сеанса $ПАС_{10}$.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует возможность использования сеанса $ПАС_{10}$ для целенаправленного влияния на скоростно-силовые характеристики произвольного движения человека. Наблюдаемые эффекты в целом положительно сказываются на развиваемой в процессе выполнения максимального подошвенного сгибания стопы абсолютной силе и скорости достижения как максимального усилия, так и 50% его величины. Сеанс $ПАС_{10}$ также приводит к увеличению усилия, развиваемого спортсменом за первые 100 мс максимального произвольного сокращения, что имеет важное значение для представителей скоростно-силовых видов спорта.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hummel, F.C. Non-invasive brain stimulation: a new strategy to improve neurorehabilitation after stroke? / F.C. Hummel, L.G. Cohen // The Lancet Neurology. – 2006. – Vol. 5. – No. 8. – P. 708-712.
2. Long-term paired associative stimulation can restore voluntary control over paralyzed muscles in incomplete chronic spinal cord injury patients / A. Shulga, P. Lioumis, A. Zubareva [et al.] // Spinal cord series and cases. – 2016. – Vol. 2. – No. 1. – P. 1-9.
3. A systematic review of paired associative stimulation (PAS) to modulate lower limb corticomotor excitability: implications for stimulation parameter selection and experimental design / G. Alder, N. Signal, S. Olsen, D. Taylor // Frontiers in neuroscience. – 2019. – Vol. 13. – P. 895.
4. Neurophysiological changes after paired brain and spinal cord stimulation coupled with locomotor training in human spinal cord injury / T.S. Pulverenti, M. Zaaya, M. Grabowski [et al.] // Frontiers in Neurology. – 2021. – Vol. 12. – P. 627975.
5. A novel paired associative stimulation protocol with a high-frequency peripheral component: A review on results in spinal cord injury rehabilitation / A. Shulga, P. Lioumis, E. Kirveskari [et al.] // European Journal of Neuroscience. – 2021. – Vol. 53. – No. 9. – P. 3242-3257.
6. Long-term paired associative stimulation enhances motor output of the tetraplegic hand / A. Tolmacheva, S. Savolainen, E. Kirveskari [et al.] // Journal of neurotrauma. – 2017. – Vol. 34. – No. 18. – P. 2668-2674.
7. The immediate and short-term effects of transcutaneous spinal cord stimulation and peripheral nerve stimulation on corticospinal excitability / Y. Al'joboori, R. Hannah, F. Lenham [et al.] // Frontiers in Neuroscience. – 2021. – Vol. 15. – P. 749042.
8. Feldman, D.E. The spike-timing dependence of plasticity / D.E. Feldman // Neuron. – 2012. – Vol. 75. – No. 4. – P. 556-571.
9. The use of F-response in defining interstimulus intervals appropriate for LTP-like plasticity induction in lower limb spinal paired associative stimulation / A. Shulga, P. Lioumis, E. Kirveskari [et al.] // Journal of Neuroscience Methods. – 2015. – Vol. 242. – P. 112-117.
10. Ivanov, S.M. The Effect of Paired Associative Stimulation on the Speed-Strength Parameters of Human Voluntary Movement / S.M. Ivanov, V.N. Shlyakhtov, R.M. Gorodnichev // Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. – 2024. – Vol. 60. – No. 6. – P. 2547-2556.
11. Иванов, С.М. Влияние длительности внутристимульного интервала и амплитуды стимула ТМС в составе парного ассоциативного стимула на кортикоспинальную возбудимость/ С.М. Иванов, Р.М. Городничев // Физическая культура, спорт, олимпизм: проблемы и перспективы: сборник статей III открытой научно-практической конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг. и 55-летию ВЛГАФК / редколлегия: В.Н. Шляхтов, Р.М. Городничев, Д.А. Белюков [и др.]. – Великие Луки, 2025. – 240 с.
12. Иванов, С.М. Синхронизирующее устройство для реализации парной ассоциативной стимуляции / С.М. Иванов, Р.М. Городничев // Физическая культура, спорт, олимпизм: проблемы и перспективы: Сборник статей II открытой научно-практической конференции, посвященной 10-летию XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года в г. Сочи, 100-летию Великолукского уездного комитета по физической культуре, Великие Луки, 21 марта 2024 года. – Великие Луки: Великолукская государственная академия физической культуры и спорта, 2024. – С. 60-65.
13. Влияние парной ассоциативной стимуляции на физические качества спортсменов / С.М. Иванов, Д.А. Вериго, Р.М. Городничев, В.Н. Шляхтов // Физическое воспитание и спортивная тренировка. – 2024. – № 4(50). – С. 125-133.

REFERENCES

1. Hummel F.C., Cohen L.G. Non-invasive brain stimulation: a new strategy to improve neurorehabilitation after stroke? *The Lancet Neurology*, 2006, vol. 5, no. 8, pp. 708-712.

2. Shulga A., Lioumis P., Zubareva A. et al. Long-term paired associative stimulation can restore voluntary control over paralyzed muscles in incomeplete chronic spinal cord injury patients. *Spinal cord series and cases*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 1-9.
3. Alder G., Signal N., Olsen S., Taylor D. A systematic review of paired associative stimulation (PAS) to modulate lower limb corticomotor excitability: implications for stimulation parameter selection and experimental design. *Frontiers in neuroscience*, 2019, vol. 13, p. 895.
4. Pulverenti T.S., Zaaya M., Grabowski M. et al. Neurophysiological changes after paired brain and spinal cord stimulation coupled with locomotor training in human spinal cord injury. *Frontiers in Neurology*, 2021, vol. 12, p. 627975.
5. Shulga A., Lioumis P., Kirveskari E., Savolainen S., Mäkelä J.P. A novel paired associative stimulation protocol with a high-frequency peripheral component: A review on results in spinal cord injury rehabilitation. *European Journal of Neuroscience*, 2021, vol. 53, no. 9, pp. 3242-3257.
6. Tolmacheva A., Savolainen S., Kirveskari E. et al. Long-term paired associative stimulation enhances motor output of the tetraplegic hand. *Journal of neurotrauma*, 2017, vol. 34, no. 18. pp. 2668-2674.
7. Al'joboori Y., Hannah R., Lenham F. et al. The immediate and short-term effects of transcutaneous spinal cord stimulation and peripheral nerve stimulation on corticospinal excitability. *Frontiers in Neuroscience*, 2021, vol. 15, p. 749042.
8. Feldman D.E. The spike-timing dependence of plasticity. *Neuron*, 2012, vol. 75, no. 4, pp. 556-571.
9. Shulga A., Lioumis P., Kirveskari E., Savolainen S., Mäkelä J.P., Ylinen A. The use of F-response in defining interstimulus intervals appropriate for LTP-like plasticity induction in lower limb spinal paired associative stimulation. *Journal of Neuroscience Methods*, 2015, vol. 242, p. 112-117.
10. Ivanov S.M., Shlyakhtov V.N., Gorodnichev R.M. The Effect of Paired Associative Stimulation on the Speed-Strength Parameters of Human Voluntary Movement. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2024, vol. 60, no. 6, pp. 2547-2556.
11. Ivanov S.M., Gorodnichev R.M. The influence of the duration of the intrastimulus interval and the amplitude of the TMS stimulus as part of a paired associative stimulus on corticospinal excitability. Physical Culture, Sport, Olympism: Problems and Prospects: collection of articles of the III Open Scientific and Practical Conference dedicated to the 80th anniversary of Victory in the Great Patriotic War of 1941-1945 and the 55th anniversary of the All-Russian Academy of Sciences. Shlyakhtov V.N., Gorodnichev R.M., Belyukov D.A. et al, ed. Velikiye Luki, 2025. 240 p. (in Russ)
12. Ivanov S.M., Gorodnichev R.M. Synchronizing device for the implementation of pair associative stimulation. Physical Culture, Sport, Olympism: Problems and Prospects: Collection of articles of the II Open Scientific and Practical Conference dedicated to the 10th Anniversary of the XXII Olympic Winter Games and XI Paralympic Winter Games 2014 in Moscow. Sochi, the 100th anniversary of the Velikiye Luki District Committee for Physical Culture (Velikiye Luki, March 21, 2024). Velikiye Luki: Velikiye Luki State Academy of Physical Culture and Sports, 2024, pp. 60-65. (in Russ)
13. Ivanov S.M., Verigo D.A., Gorodnichev R.M., Shlyakhtov V.N. Influence of paired associative stimulation on athletes' physical qualities. *Physical education and sports training*, 2024, no. 4(50), pp. 125-133. (in Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:
Сергей Михайлович Иванов – младший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта», Великие Луки, e-mail: sergiusvl@yandex.ru.
Руслан Михайлович Городничев – заведующий кафедрой физиологии и спортивной медицины, ФГБОУ ВО «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта», Великие Луки, e-mail: gorodnichev@vlgafc.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Sergej M. Ivanov – Junior Researcher, Velikiye Luki State Academy of Physical Education and Sports, Velikie Luki, e-mail: sergiusvl@yandex.ru.
Ruslan M. Gorodnichev – Head of the Department of Physiology and Sports Medicine, Velikie Luki State Academy of Physical Education and Sports, Velikiye Luki, e-mail: gorodnichev@vlgafc.ru.

Для цитирования: Иванов, С.М. Влияние сеанса парной ассоциативной стимуляции с опережением прибытия транскраниального стимула на скоростно-силовые характеристики произвольного движения человека / С.М. Иванов, Р.М. Городничев // Современные вопросы биомедицины. – 2025. – Т. 9. – № 4(34). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_04_10

For citation: Ivanov S.M., Gorodnichev R.M. The effect of paired associative stimulation with a transcranial stimulus advance arrival on the human's voluntary contraction speed-strength characteristics. *Modern Issues of Biomedicine*, 2025, vol. 9, no. 4(34). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_04_10