

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖКОНЕЧНОСТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
У ЧЕЛОВЕКА ПРИ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ
СПИННОГО МОЗГА**

© 2019 г. Н. А. Щербакова^{1, *}, И. Н. Богачева¹, А. А. Гришин¹, Т. Р. Мошонкина¹,
Р. М. Городничев², Ю. П. Герасименко¹

¹Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН,
Санкт-Петербург, Россия

²Великолукская государственная академия физической культуры и спорта,
Великие Луки, Россия

*E-mail: chsherbakovana@infran.ru

Поступила в редакцию 24.07.2019 г.

После доработки 08.10.2019 г.

Принята к публикации 08.10.2019 г.

Исследовали влияние активации спинальных локомоторных центров на шейном и поясничном уровнях на межконечностные синергии у человека. Испытуемые находились в биомеханическом тренажере в положении полулежа и выполняли произвольные ритмические движения ног, двигая каретки шагательного устройства тренажера, или произвольные движения рук, двигая рычаги тренажера, либо осуществляли одновременное движение рук и ног. В состоянии покоя последовательная чрескожная стимуляция спинного мозга на трех уровнях (положения катодов между С4–С5, Т12–L1, L1–L2 позвонками) у большинства испытуемых не вызывала движений ног, однако, при выполнении движений рук в сочетании со стимуляцией инициировались небольшие по амплитуде (до 10 угл. град.) движения во всех суставах ног. Стимуляция спинного мозга и одновременные движения рук вызывали облегчение выполнения произвольных движений ног, что проявлялось в увеличении интегральной характеристики электрической активности мышц и в увеличении амплитуды движений в тазобедренных суставах. Полученные результаты могут быть использованы для разработки метода нейрореабилитации для больных с нарушением двигательных функций.

Ключевые слова: спинной мозг, электрическая стимуляция, межконечностные синергии

DOI: 10.1134/S0869813919120124

Известно, что при ходьбе движения ног и рук координированы и являются проявлением межконечностной синергии. При шагательных движениях человека включаются двигательные синергии, соответствующие локомоции при диагональной походке четвероногих животных. Предполагается, что спинальные нейронные сети — генераторы ритма для верхних и нижних конечностей, — функционально связаны между собой [1]. Недавно было показано, что диагональные синергии между верхними и нижними конечностями оказывают сильное влияние на активацию межнейронных связей между генераторами у здоровых испытуемых в положении лежа, и межконечностные эффекты зависят от двигательной задачи [2, 3]. Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга (ЧЭССМ), наряду с другими

неинвазивными воздействиями, такими как магнитная стимуляция [4, 5], стимуляция опорной поверхности стоп [6] или вибрация мышц [7] способна вызывать произвольные шагательные движения у здоровых испытуемых в положении лежа на боку с компенсацией веса ног и при вертикальном положении с компенсацией веса тела около 100% [8]. Полагают, что ЧЭССМ непосредственно воздействует на нейронную сеть, называемую генератором шагательных движений, и способствует повышению возбудимости афферентных входов. В настоящей работе исследовали характеристики двигательных ответов в мышцах верхних и нижних конечностей при мультисегментарной ЧЭССМ, осуществляемой в условиях покоя и при выполнении произвольных ритмических движений рук и ног испытуемым, находящимся в биомеханическом тренажере. Испытуемые располагались в тренажере в положении полулежа, такое положение исключает участие механизмов поддержания вертикальной позы. Тренажер позволял совершать произвольные движения ног, воспроизводящие ходьбу на месте, и активные движения рук во всех суставах в сагиттальной плоскости; таким образом обеспечивая возможность изучения межконечностных взаимодействий.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполнены на базе Великолукской академии физической культуры и спорта (ВЛГАФК). В исследованиях принимали участие здоровые добровольцы — мужчины ($n = 11$, 20–35 лет). Исследование было одобрено этической комиссией ВЛГАФК. В соответствии с принципами Хельсинкской декларации было получено информированное письменное согласие испытуемых на участие в исследованиях.

Испытуемые находились в положении полулежа в биомеханическом тренажере Биокин-ЭС (ООО Косима) [9]). Тренажер обеспечивает выполнение произвольных или принудительных движений ног и/или рук. Стопы испытуемых крепятся в каретках тренажера, руки лежат на рычагах и фиксируются в области кисти (рис. 1). Движения ног в полном объеме возможны в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах, движения имитируют ходьбу на месте. Движения рук в сагиттальной плоскости, напоминающие педалирование, осуществляются в плечевом, локтевом и лучезапястном суставах с использованием системы рычагов тренажера.

ЧЭССМ проводили на трех уровнях: между позвонками Th11–T12, L1–L2, C5–C6 в соответствии с описанной ранее методикой [10]. Для ЧЭССМ использовали электростимулятор Биостим-5 [8]. Применяли прямоугольные монополярные импульсы длительностью 1 мс; частота следования импульсов 30 Гц; импульсы заполнены частотой 5 кГц. Интенсивность стимуляции подбирали индивидуально, постепенно увеличивая интенсивность от 5 мА, добиваясь двигательного ответа во всех регистрируемых мышцах при стимуляции на поясничном уровне. Интенсивность стимуляции на шейном уровне подбирали, ориентируясь на ощущения испытуемых — интенсивность стимуляции была подпороговой относительно интенсивности, вызывающей парестезию. Сила тока не превышала 30 и 70 мА при стимуляции на шейном и поясничном уровне соответственно.

Электрическую активность мышц бедра (*m. biceps femoris*, *m. rectus femoris*), и мышц голени (*m. gastrocnemius*, *m. tibialis anterior*) обеих ног регистрировали с использованием биполярных накожных электродов в соответствии с описанной ранее методикой [4]. Сигналы ЭМГ дифференциально усиливали (диапазон частот от 10 Гц до 10 кГц) с помощью 8-канальной электромиографической системы ME 6000 (MegaWin, Финляндия) и оцифровывали с частотой 2 кГц. Сигналы ЭМГ фильтровали от артефактов стимуляции и анализировали в режиме офлайн.

Кинематику движений ног регистрировали с использованием системы Qualisys (Gothenburg, Швеция). Светоотражающие маркеры, расположенные на латераль-



Рис. 1. Условия исследования. Исходное положение испытуемого в тренажере.
Fig. 1. The investigation conditions. The initial position of subject in the biomechanical simulator.

ном мышелке плеча, большом вертеле бедра, колене, латеральной лодыжке и четвертом пальце ноги, использовали для реконструкции кинематики шагательных движений. Угловые движения бедра, колена и голеностопных суставов определяли по суставным маркерам в соответствии с ранее описанной методикой [5]. Для регистрации движений рук применяли локтевые гониометры (MegaWin, Финляндия).

Протокол включал следующие серии исследований:

1) выполнение произвольных движений ног в комфортном ритме (30 с), затем добавлялись произвольные движения рук (30 с), потом остановка рук и продолжение движения ног (30 с);

2) после 30 с без движений последовательное включение через 30 с стимуляции на уровнях T11–T12, L1–L2 и C5–C6, через 30 с произвольные движения рук на фоне ЧЭССМ на трех уровнях одновременно (30 с);

3) после 30 с произвольных движений ног последовательное включение через 30 с стимуляции на уровнях T11–T12, L1–L2 и C5–C6, через 30 с произвольные движения рук на фоне движений ног и ЧЭССМ на трех уровнях одновременно (30 с).

При вызове произвольных шагательных движений испытуемым была дана инструкция не осуществлять никаких самостоятельных движений, для переключения внимания испытуемых просили выполнять счет арифметических задач.

Анализировали влияние характера движений и уровней стимуляции спинного мозга на кинематические параметры движений ног (амплитуду и скорость изменений углов тазобедренного, коленного и голеностопного суставов, амплитуду и скорость шага) и ЭМГ-активность мышц ног. Рассчитывали интегральную характеристику ЭМГ для каждого из режимов, для чего запись ЭМГ фильтровали от артефактов ЧЭССМ, которые могли проявляться на записях ЭМГ с мышц бедра, переводили в положительную область и определяли суммы во временных интервалах

30 с. Изменения интегральной характеристики в каждом из режимов оценивали по ее отношению к значению в начальном условии (т.е. за первые 30 с исследования). Рассчитанные относительные величины усредняли для всех испытуемых, учитывали данные обеих ног. Кинематические характеристики рассчитывали на основе видеозаписи по координатам маркеров, расположенных на суставах, амплитуду и скорость шага – по координатам движений большого пальца.

Математическая обработка данных выполнена с помощью оригинальных программ и электронных таблиц Microsoft Excel. Статистическую значимость изменений характеристик оценивали с использованием *t*-критерия Стьюдента, отличия считались достоверными при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Произвольные движения рук и произвольные движения ног

Индивидуальные кинематические параметры произвольных шагательных движений ног в комфортном для испытуемых режиме значительно различались: амплитуда шага варьировала от 23 до 54 см (средняя по всем испытуемым 37 ± 8 см), длительность шага от 1.98 до 2.84 с (средняя 2.35 ± 0.27 с), скорость от 0.16 до 0.21 м/с (средняя 0.18 ± 0.02 м/с). Маленькая скорость шага свидетельствует о большой механической работе, которую испытуемым приходилось совершать, передвигая каретки тренажера, в которые закреплены ноги. Средние амплитуды движений в суставах: в тазобедренном 32 ± 4 , в коленном 57 ± 8 и в голеностопном 9 ± 3 угл. град.

При одновременных движениях рук и ног отмечали индивидуальные особенности эффекта движений рук на движения ног (рис. 2А, Б). Изменения амплитуды шага, измеренной по линейным перемещениям светоотражающего маркера на пальце ноги, составили до 7 см разной направленности (увеличение у 55%, уменьшение у 45% испытуемых) и длительности шага – до 150 мс (увеличение у 39%, не изменялась или немного уменьшалась у 61% испытуемых). Изменения размаха движений в суставах в большей степени проявлялись в движениях в тазобедренном (до 10 угл. град.) и в меньшей степени в коленном (до 5 угл. град.) и голеностопном (до 3 угл. град.) суставах. Координация движений рук и ног соответствовала координации при естественной ходьбе с последовательным чередованием шага левой ноги со сгибанием правой руки и шага правой ноги со сгибанием левой руки.

Шагательный ЭМГ паттерн (рис. 3А) демонстрировал реципрокную ритмическую активность мышц-антагонистов бедра и голени.

Интегральная характеристика ЭМГ-активности всех исследуемых мышц достоверно возрастала при подключении произвольных движений рук и уменьшалась после их остановки (рис. 3Б). У тех испытуемых, у которых амплитуда шага уменьшалась, отмечалось небольшое уменьшение интегральной характеристики ЭМГ отдельных мышц и увеличение на других, что не носило закономерный характер. Во всех исследуемых мышцах наблюдалась пачечная ЭМГ-активность, преимущественной доли каких-либо отдельных мышц в суммарной интегральной характеристике ЭМГ-активности не выявлено (рис. 3В).

ЧЭССМ и движения рук

У 9-ти испытуемых инициация шагательных движений ног при стимуляции трех уровней спинного мозга не наблюдалась, что, вероятно, обусловлено недостаточной для сдвига тяжелой каретки тренажера мощностью вызванной мышечной активности (для выполнения движений каретки тренажера необходимы усилия ног испытуемого до 100 Н, усилия рук для сдвига рычагов – до 20 Н). У 2-х испытуемых стимуляция на уровне T11–T12 вызывала произвольные шагательные движения ног. Включение стимуляции на уровне L2 увеличивало мощность ответа, а стиму-

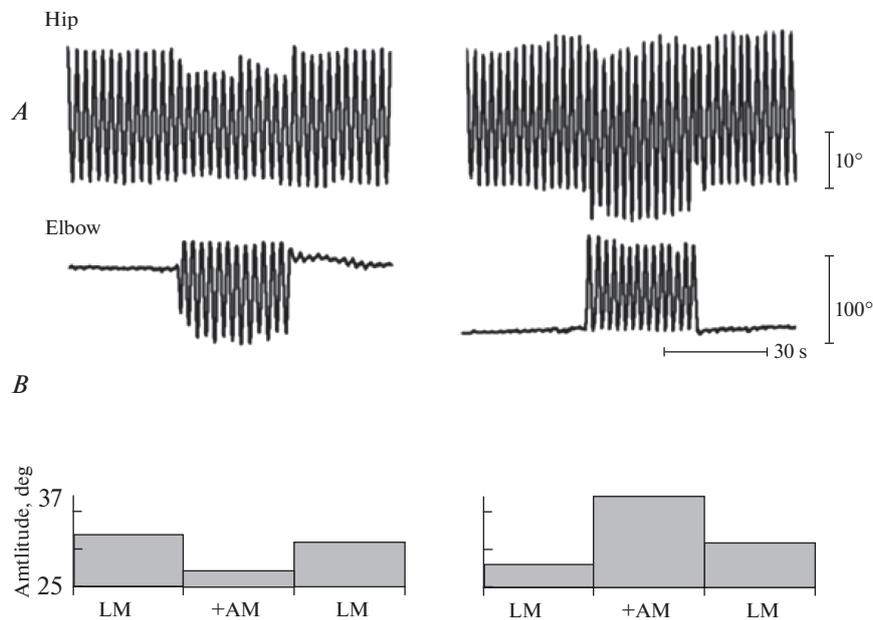


Рис. 2. Индивидуальные особенности координации произвольных движений рук и ног. Слева исп. С.В., справа исп. А.А. *А*) динамика изменений угла в тазобедренном (Hip) и локтевом суставах (Elbow). *Б*) усредненные за 30 с изменения амплитуды движений в тазобедренном суставе; LM – произвольные движения ног, +AM – подключение произвольных движений рук, по оси ординат – угл. град.

Fig. 2. Individual features of coordination of voluntary arms and legs movements. Left: subject S.V., right: subject A.A. *A*) Changes of HIP and elbow angles. *B*) Changes of the amplitude of HIP angle averaged over 30 s; LM – voluntary legs movements, +AM voluntary movements of the arms.

ляция на уровне С5 инициировала движения в локтевом суставе. У этих испытуемых последовательное включение стимуляции в обратном порядке инициировало сначала движения рук, а затем непроизвольное движение ног (рис. 4). Важно отметить, что при последовательном включении стимуляции в восходящем направлении (L2 + Th12 + С6) возникающие движения рук согласовывались с движениями ног и были синфазными (рис. 4А), тогда как при стимуляции в нисходящем направлении (С6 + Th12 + L2) межконечностной координации не происходило, руки и ноги двигались независимо друг от друга (рис. 4Б).

При сочетании ЧЭССМ и произвольных движений рук у всех испытуемых отмечались небольшие по амплитуде (до 10 угл. град. в суставах) движения ног (рис. 5А), причем движения правой и левой ног были реципрокны (рис. 5Б). Амплитуда движений маркеров на четвертых пальцах ног составляла до 4–5 см. Интегральная характеристика ЭМГ-активности всех исследуемых мышц возрастала при подключении каждого следующего уровня стимуляции спинного мозга и при произвольных движениях рук (рис. 5В).

ЧЭССМ, движения рук и произвольные движения ног

При выполнении испытуемыми произвольных движений ног ЧЭССМ и инициация произвольных движений рук вызывала недостоверные изменения амплитуды шага (до 4 см) и длительности шага (до 120 мс) разной направленности. Такой же ин-

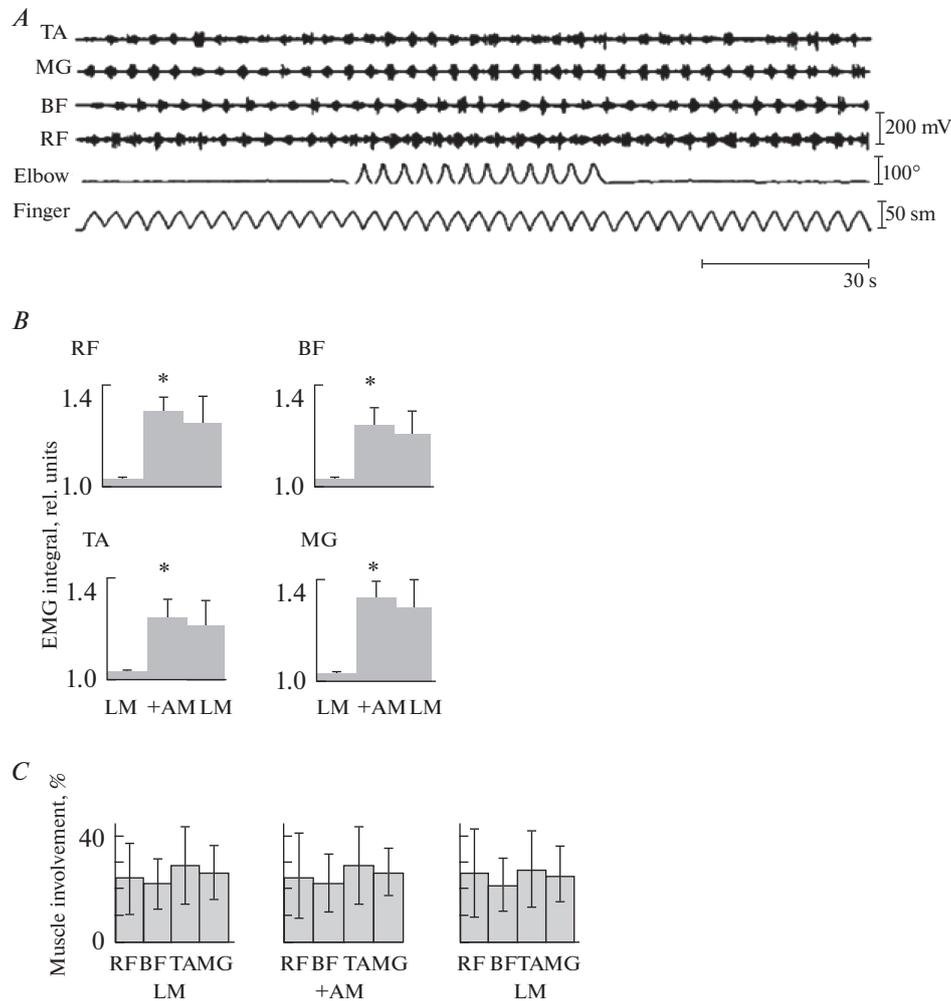


Рис. 3. Изменения активности мышц ног при подключении движений рук на фоне произвольных движений ног. *A*) оригинальная запись двигательной активности, исп. В.Д.; ЭМГ записи m. tibialis anterior (TA), m. gastrocnemius medial (MG), m. biceps femoris (BF), m. rectus femoris (RF) правой ноги, изменения угла в правом локтевом суставе (Elbow), изменение положения правой стопы по маркеру на четвертом пальце. *B*) относительные интегральные характеристики ЭМГ активности за 30 с; средние значения по всем испытуемым; за 1 принято значение при начальном условии, LM – произвольные движения ног, AM – произвольные движения рук; * – достоверные различия ($p < 0.05$) между условиями эксперимента. *C*) распределение долей активности отдельных мышц в суммарной интегральной характеристике ЭМГ активности мышц, усредненные результаты по всем испытуемым.

Fig. 3. Changes of the legs muscles EMG activity caused by voluntary arm movements during voluntary legs movements. *A*) the original EMG recording of motor activity, subject V.D.; m. tibialis anterior (TA), m. gastrocnemius medial (MG), m. biceps femoris (BF), m. rectus femoris (RF) of the right leg, changes of right elbow angle, changes of the position of marker on the fourth finger of the right leg. *B*) the relative integrated characteristics of EMG activity for 30 seconds, average values for all subjects; 1 – the value under the initial condition, LM – voluntary leg movements, +AM – voluntary arm movements; * – significant differences ($p < 0.05$) between the experimental conditions. *C*) distribution of involvement of individual muscles in the total integral characteristic of EMG muscle activity, averaged results for all subjects.

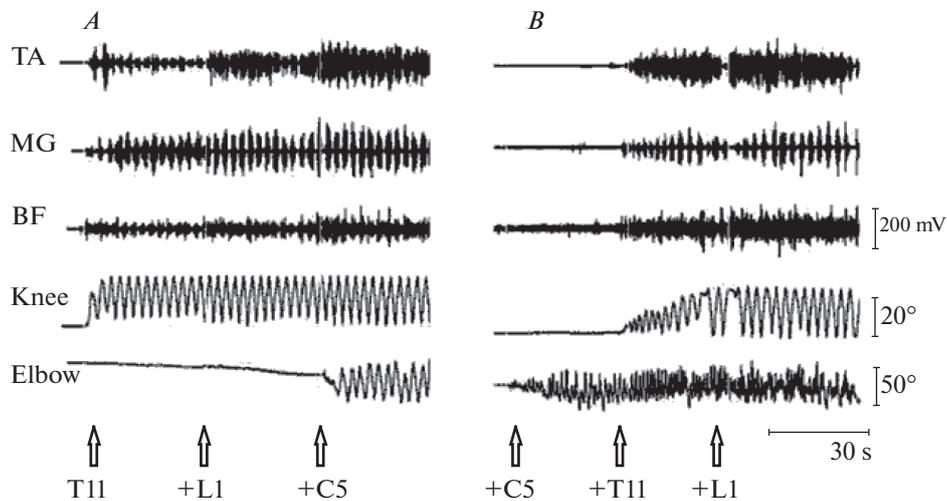


Рис. 4. Инициация произвольных движений ног и рук. *А)* ЭМГ – записи, зарегистрированные с мышц *m. tibialis anterior* (TA), *m. gastrocnemius medial* (MG), *m. biceps femoris* (BF) и изменения углов коленного (Knee) и локтевого (Elbow) суставов испытуемого Г.Д. при включении ЧЭССМ в области позвонков Th11, L1 и C5), моменты начала стимуляции отмечены стрелками. *В)* Изменение порядка включения стимулов.

Fig. 4. Initiation of involuntary legs and arms movements. *A)* EMG – recordings from *m. tibialis anterior* (TA), *m. gastrocnemius medial* (MG), *m. biceps femoris* (BF) and changes in knee and elbow angles of subject G.D. Transcutaneous electrical stimulation (Th11, L1 and C5), arrows – the moments of the onset of stimulation. *B)* Change of the order of onset of stimulation.

дивидуальный разнонаправленный характер имели изменения размаха движений в суставах ног (до 5–8 угл. град.) (рис. 6А). Интегральная характеристика ЭМГ-активности исследуемых мышц достоверно возрастала при подключении каждого следующего уровня стимуляции (рис. 6Б, В).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее было показано облегчающее влияние ритмических движений рук на активацию мышц ног. Так, движение рук способствовало инициации произвольной шагательной ритмики при подпороговой вибрации мышц у испытуемых, лежащих на боку, с компенсацией веса верхних и нижних конечностей [7]. При ходьбе по беговой дорожке у здоровых испытуемых при подключении движений рук резко возрастала активность в дистальных и проксимальных мышцах [11]. Амплитуда ЭМГ-активности мышц ног увеличивалась также при увеличении усилия, прикладываемого к руке, или увеличении частоты ее движений [12]. В наших исследованиях мы наблюдали схожий эффект: мышечная активность возрастала при подключении рук в среднем в 1.4 раза, при этом более выраженный эффект наблюдался в *m. rectus femoris* и *m. tibialis anterior*. Следует отметить, что, находясь в тренажере, испытуемые были вынуждены двигать ногами тяжелые каретки – это проявляется в зарегистрированной низкой скорости “ходьбы”. Для достижения цели испытуемые выбирали индивидуальную стратегию, которая проявлялась в изменениях кинематических параметров движений: уменьшение или увеличение амплитуды и длительности шага. Движения рук оказывали влияние на движения во всех суставах

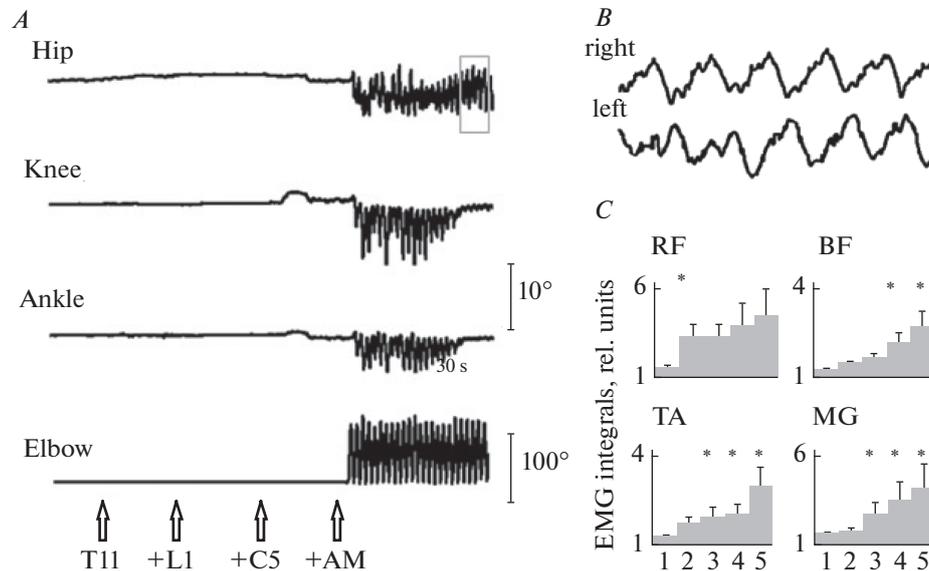


Рис. 5. Влияние ЧЭССМ и движений рук на произвольные движения ног. *А)* Изменения углов тазобедренного (Hip), коленного (Knee), голеностопного (Ankle) и локтевого (Elbow) суставов при ЧЭССМ на уровне позвонков Th12–L1, L1–L2 и C5–C6 и произвольных движениях руками (AM); моменты начала отмечены стрелками; исп. Б.А. *В)* реципрокность движений тазобедренного сустава правой и левой ног, соответствует временному интервалу, выделенному прямоугольником в части *А*. *С)* относительные интегральные характеристики ЭМГ активности мышц ног за 30 с; средние значения по всем испытуемым; за 1 принято значение при условии 1; 1 – состояние покоя, 2, 3 и 4 – последовательное начало ЧЭССМ на уровне позвонков Th12–L1, L1–L2 и C5–C6 соответственно, 5 – произвольные движения рук. * – достоверные различия ($p < 0.05$) между условиями эксперимента.

Fig. 5. Influence of the transcutaneous electrical stimulation and arm movements on involuntary leg movements. *A)* Changes in the hip, knee, ankle and elbow angles under stimulation (Th12–L1, L1–L2, and C5–C6 vertebrae) and voluntary arms movements; arrow - onset of stimulation; subject B.A. *B)* the reciprocity of the hip movements of the right and left legs; time interval indicated by the rectangle in part *A*. *C)* relative integral characteristics of EMG activity for 30 s; average values for all subjects; 1 – the value under condition 1; 1 – resting state, 2, 3, and 4 – sequential onset of stimulation at Th12–L1, L1–L2 and C5–C6 vertebrae, 5 – voluntary arms movements. * – significant differences ($p < 0.05$) between the experimental conditions.

ног, однако, наиболее выраженный эффект наблюдался в тазобедренном суставе, что согласуется с данными о том, что спинальные рефлекторные механизмы формируют локомоторный паттерн под влиянием входов, связанных с положением бедра. [13]. При этом часть испытуемых увеличивала угол разгибания в тазобедренном суставе, у других же этот угол при подключении рук уменьшался. Это может зависеть от разных факторов, в частности, от величины проприоцептивного притока от движущихся рук, от начальной амплитуды движений в суставах ног [3]. Заметим, что вопрос о фазировании движений верхних и нижних конечностей в нашем исследовании не рассматривался, поскольку известно, что в положении лежа, когда не нужно поддерживать равновесие, как во время ходьбы, и нет необходимости включать диагональные синергии, влияние синфазных и противофазных движений рук оказывается сопоставимым [14, 15]. В наших исследованиях испытуемые выполняли произвольные движения ног, при этом предполагается, что акти-

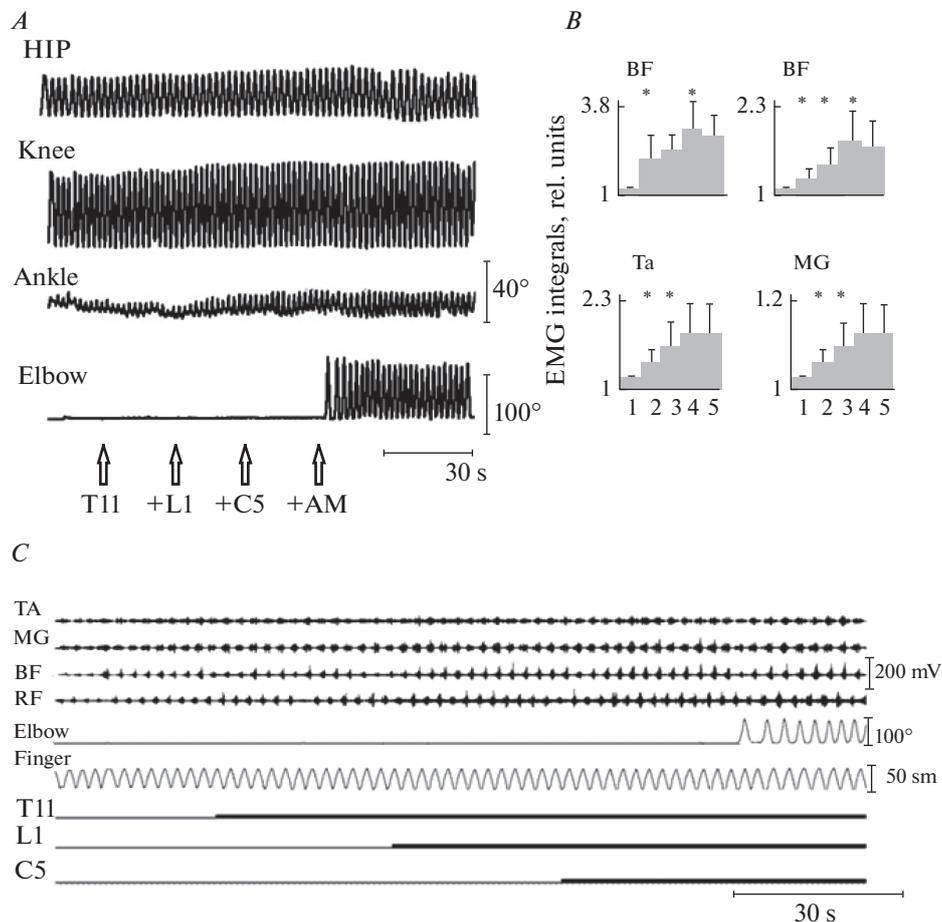


Рис. 6. Влияние ЧЭССМ и движений рук на характеристики произвольных движений ног. *A)* как на рис. 5*A*. исп. А.А. *B)* как на рис. 5*B*. * – достоверные различия ($p < 0.05$) между условиями эксперимента. *C)* оригинальная запись двигательной активности. ЭМГ записи мышц *m. tibialis anterior* (TA), *m. gastrocnemius medial* (MG), *m. biceps femoris* (BF) правой ноги, изменения угла в правом локтевом суставе (Elbow), изменение положения правой стопы по маркеру на четвертом пальце, сигналы действия стимула по 3-м каналам (в области позвонков Th11, L1 и C5).

Fig. 6. Influence of the transcutaneous electrical stimulation and arm movements on voluntary leg movements. *A)* as in fig. 5, subject A.A. *B)* as in fig. 5. * – significant differences ($p < 0.05$) between the experimental conditions. *C)* the original recording of motor activity. EMG recording *m. tibialis anterior* (TA), *m. gastrocnemius medial* (MG), *m. biceps femoris* (BF) of the right leg, changes in the right elbow angle, change in the position of the marker on the fourth finger of the right leg, stimulus signals in Th11, L1 and C5 vertebrae.

вазия нейронных сетей люмбального отдела спинного мозга происходит с участием супраспинальных влияний [16]. Вероятно, в нашем случае участие супраспинальных команд в регуляции произвольных движений, дающее больше свободы для проявления индивидуальных стратегий, может служить объяснением разнонаправленного изменения кинематических характеристик при подключении произвольных движений рук на фоне произвольных движений ног здоровыми испытуемыми.

Как уже отмечалось ранее, ЧЭССМ способна вызывать произвольные шагательные движения в условиях гравитационной разгрузки ног [5]. При последовательном включении стимуляции на трех уровнях спинного мозга мы наблюдали возрастание интегральной характеристики ЭМГ во всех регистрируемых мышцах, однако кинематические движения ног не вызывались. Вместе с тем, на фоне стимуляции спинного мозга подключение движений рук вызывало у всех испытуемых движения ног, причем, эти движения в правой и левой ноге были реципрокными.

Полагают, что взаимодействие нервных центров верхних и нижних конечностей происходит только в динамических условиях, т.е. только при их совместных движениях. Так, при исследовании рефлексов в мышцах ног в положении лежа отмечалось, что эффект циклических движений рук на рефлексы в мышцах при неподвижных ногах был меньшим, чем при совместном движении рук и ног [17, 18]. Показано, что при циклических движениях рук изменяется возбудимость моторных пулов поясничного утолщения, амплитуда Н-рефлекса уменьшается приблизительно на 25–30% [18]. Это подавление связывается с усилением пресинаптического торможения в терминалях люмбальных афферентов группы Ia [19].

В наших исследованиях ЧЭССМ выполняла роль тонической активации спинальных локомоторных сетей, и на этом фоне подключение рук вызывало одинаковый эффект у всех испытуемых – возрастание ЭМГ-активности в мышцах ног. Схожий результат наблюдался при подключении рук на фоне произвольной шагательной ритмики, вызванной вибрацией в условиях горизонтальной вывески [7]. При этом авторы отмечают хотя и незначительное, но увеличение объема движений. В наших экспериментах размах движений в различных суставах ног изменялся разнонаправленно: либо увеличивался, либо уменьшался. Вероятно, это связано с особенностями выполняемой испытуемым задачи – осуществить движения кареток усилиями ног, жестко закрепленными в тренажере, что может нарушать естественную локомоторную синергию.

Известно, что регуляция шагательных движений осуществляется на основе взаимодействия супраспинальных входов, работы спинальных генераторов ритма и сенсорной обратной связи [21, 22]. Исходя из этого, экспериментально можно воздействовать на то или иное звено в этой цепи управления моторным выходом. Полученные данные показывают, что активация нейронных сетей шейного и люмбосакрального отдела при помощи ЧЭССМ позволяет управлять межконечностными синергиями. Это открывает новые возможности использования мультисегментарной электрической стимуляции спинного мозга в сочетании с механотерапией для разработки методов реабилитации моторных нарушений.

Выводы:

1. Мультисегментарная электрическая стимуляция спинного мозга активирует нейронные спинальные сети, контролирующие движения рук и ног, и увеличивает мощность мышечных ответов на фоне произвольных движений.

2. При последовательной стимуляции сначала поясничного, а потом шейного отдела инициация движений ног и рук осуществлялась координированно с диагональным межконечностным паттерном. При обратной последовательности стимуляции (шейный–поясничный отдел) вовлечение в активность движений рук и ног происходило независимо, и межконечностная синергия не возникала.

3. Движения верхних конечностей в сочетании с мультисегментарной стимуляцией спинного мозга оказывают облегчающие влияния на межконечностные взаимодействия, усиливают моторный ответ в мышцах ног, вызывают движения нижних конечностей, а также изменяют их характеристики при произвольных движениях.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-29-08173-ofi_m

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wannier T., Bastiaanse C., Colombo G., Dietz V. Arm to leg coordination in human during walking, creeping and swimming activities. *Exp Brain Res.* 141(3): 375–379. 2001
2. Kao P.-C., Ferris D.P. The effect of movement frequency on interlimb coupling during recumbent stepping. *Motor Control.* 9(2): 144–163. 2005
3. Солопова И.А., Селионов В.А., Жванский Д.С., Гришин А.А. Взаимовлияние верхних и нижних конечностей при циклических движениях. *Физиология человека.* 37(4): 55–64. 2011. [Solopova I.A., Selionov V.A., Zhvansky D.S., Grishin A.A. Mutual influences of upper and lower extremities during cyclic movements. *Human Physiology.* 37(4): 440–448. 2011. (In Russ.)].
4. Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Machueva E., Pivovarova E., Semyenov D., Savochin A., Roy R.R., Edgerton V.R. Novel and direct access to the human locomotor spinal circuitry. *J Neurosci.* 30(10): 3700–3708. 2010.
5. Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Puhov A., Moshonkina T., Savochin A., Selionov V., Roy R.R., Lu D.C., Edgerton V.R. Initiation and modulation of locomotor circuitry output with multisite transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord in noninjured humans. *J. Neurophysiol.* 113(3): 834–842. 2015
6. Tomilovskaya E.S., Shigueva T.A., Zakirova A.Z. Mechanical stimulation of the support zones of soles: The method of noninvasive activation of the stepping movement generators in humans. *Human Physiology.* 39(5): 480–485. 2013.
7. Selionov V.A., Solopova I.A., Zhvansky D.S. Activation of interlimb interactions increases the motor output in legs of healthy subjects: study under the conditions of arm and leg unloading. *Human Physiology.* 42(1): 43–53. 2016.
8. Gerasimenko Y.P., Gad P., Sayenko D.G., McKinney Z., Gorodnichev R., Puhov A., Moshonkina T., Savochin A., Selionov V.A., Shigueva T., Tomilovskaya E., Kozlovskaya I.B., Edgerton V.R. Integration of sensory, spinal, and volitional descending inputs in regulation of human locomotion. *J. Neurophysiol.* 116(1): 98–105. 2016.
9. Гришин А.А., Мошонкина Т.Р., Боброва Е.В., Герасименко Ю.П. Комплекс для реабилитационного лечения пациентов с двигательной патологией с использованием механотерапии, чрескожной электростимуляции спинного мозга и биологической обратной связи. *Мед техника.* 4. 2019. [Grishin A.A., Moshonkina T.R., Bobrova E.V., Gerasimenko Yu.P. Complex for the rehabilitation treatment of patients with motor pathology using mechanotherapy, transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord and biofeedback. *Med Equipment.* 4. 2019. (In Russ.)].
10. Gorodnichev R.M., Pivovarova E.A., Puhov A. Transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord: A noninvasive tool for the activation of stepping pattern generators in humans. *Human Physiology.* 38(2): 158–167. 2012.
11. Kawashima N., Nozaki D., Abe M.O., Nakazawa K. Shaping appropriate locomotive motor output through interlimb neural pathway spinal cord in humans. *J. Neurophysiol.* 99(6): 2946–2955. 2009.
12. Huang H.J., Ferris D.P. Neural coupling between upper and lower limbs during recumbent stepping. *J. Appl. Physiol.* 97(4): 1299–1308. 2004.
13. Khusnutdinova D., Netreba A., Kozlovskaya I. Mechanic stimulation of the soles support zones as a countermeasure of the conditions. *J. Gravit. Physiol.* 11(2): 141–142. 2004.
14. Collins S.H., Adamczyk P.G., Kuo A.D. Dynamic arm swinging in human walking. *Proc. Biol. Sci.* 276(1673): 3679–3688. 2009.
15. De Kam D., Rijken H., Manintveld T. Arm movements can increase leg muscle activity during submaximal recumbent stepping in neurologically intact individuals. *J. Appl. Physiol.* 115(1): 34–42. 2013.
16. Solopova I.A., Selionov V.A., Kazennikov O.V., Ivanenko Y.P. Effects of transcranial magnetic stimulation during voluntary and non-voluntary stepping movements in humans. *Neurosci. Lett.* 5: 579–564. 2014.
17. Balter J.E., Zehr E.P. Neural Coupling between the arms and legs during rhythmic locomotor-like cycling movement. *J. Neurophysiol.* 97(2): 1809–1818. 2007.
18. Zehr E.P., Balter J.E., Ferris D.P., Hundza S.R., Loadman P.M., Stoloff R.H. Neural regulation of rhythmic arm and leg movement is conserved across human locomotor tasks. *J. Physiol.* 582(1): 209–227. 2007.
19. Frigon A. The neural control of interlimb coordination during mammalian locomotion. *J. Neurophysiol.* 117(6): 2224–2241. 2017.

20. Zehr E.P., Klimstra M., Dragert K. et al. Enhancement of arms and legs locomotor coupling with augmented cotaneous feedback from the hand. *J. Neurophysiol.* 98(3): 1810–1814. 2007.
21. Козловская И. Аfferentnyy kontrol proizvolnykh dvizheniy [Afferent control of voluntary movements]. Moscow. Nauka. 1976.
22. Zehr E.P., Duysens J. Regulation of arm and leg movement during human locomotion. *Neuroscientist.* 10(4): 347–361. 2004.

Investigation of the Interlimb Interactions in Subjects at Non-Invasive Electrical Stimulation of the Spinal Cord

N. A. Scherbakova^{a, *}, I. N. Bogacheva^a, A. A. Grishin^a, T. R. Moshonkina^a,
R. M. Gorodnichev^b, and Yu. P. Gerasimenko^a

^a*Pavlov Institute of Physiology Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

^b*Velikie Luki State Academy of Physical Education and Sports, Velikie Luki, Russia*

*e-mail: chsherbakovana@infran.ru

Abstract—The effects of transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord on the kinematic and electromyographic characteristics of motor responses in the arms and legs muscles in healthy subjects have been studied. The subjects placed in the biomechanical simulator in a supine position and performed voluntary rhythmic leg movements displacing the carriage of the simulator's walking device, voluntary arm movements, moving the simulator levers or performed simultaneous arm and leg movements. During the rest, the sequential stimulation at the level of Th12–L1, L1–L2 and C5–C6 vertebrae did not elicit leg movements in most subjects, however, the arm movements in combination with stimulation of the spinal cord initiated fluctuations in the joints of the legs (amplitude up to 10 angle degrees). The stimulation in combination with arm movements facilitated voluntary leg movements and increased the integral characteristic of electromyographic activity. The most pronounced changes in the amplitude of movements of the hip joint were revealed. Effects of multisegmental spinal cord stimulation in regulation of interlimb synergy were examined. The results can be used to develop the approach for neurorehabilitation of patients with impaired motor functions.

Keywords: spinal cord, electrical stimulation, interlimb synergies

ЦИТИРОВАТЬ:

Щербакова Н.А., Богачева И.Н., Гришин А.А., Мошонкина Т.Р., Городничев Р.М., Герасименко Ю.П. Исследование межконечностных взаимодействий у человека при неинвазивной электрической стимуляции спинного мозга. *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова.* 105(12): 1581–1592.

DOI: 10.1134/S0869813919120124

TO CITE THIS ARTICLE:

Scherbakova N.A., Bogacheva I.N., Grishin A.A., Moshonkina T.R., Gorodnichev R.M., Gerasimenko Yu.P. Investigation of the Interlimb Interactions in Subjects at Non-Invasive Electrical Stimulation of the Spinal Cord. *Russian Journal of Physiology.* 105(12): 1581–1592.

DOI: 10.1134/S0869813919120124