

УДК 612.83

РЕГУЛЯЦИЯ ЛОКОМОТОРНОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ЭПИДУРАЛЬНОЙ И ЧРЕСКОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА У ЖИВОТНЫХ И ЧЕЛОВЕКА*

Т.Р. Мошонкина¹, П.Е. Мусиенко¹, И.Н. Богачева¹, Н.А. Щербакова¹,
О.А. Никитин¹, А.А. Савохин¹, А.Н. Макаровский², Р.М. Городничев³,
Ю.П. Герасименко¹

¹Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук, Санкт-Петербург,

²Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии Федерального
агентства по высокотехнологичной медицинской помощи,

³Великолукская государственная академия физической культуры и спорта

Проведен сравнительный анализ двигательных эффектов, вызванных электрической эпидуральной стимуляцией и чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга у человека и у кошки. Электрическая эпидуральная стимуляция нижнего поясничного отдела спинного мозга прямоугольными биполярными стимулами с частотой 5–30 Гц способна инициировать шагательные движения у децеребрированных, спинализованных животных и пациентов с патологией спинного мозга. Показано, что чрескожная электрическая стимуляция в области T11 и T12 грудных позвонков с применением сложного по форме электрического стимула с частотами 5–40 Гц вызывает у здоровых испытуемых шагательные движения нижних конечностей в условиях внешней вывески ног в горизонтальной плоскости. Представлены новые данные, демонстрирующие эффект накожной электрической стимуляции поясничного утолщения спинного мозга у децеребрированных и хронически спинализованных кошек. Сходство локомоторных паттернов при чрескожной и эпидуральной стимуляции позволяет говорить о схожих механизмах вызываемых двигательных эффектов. Чрескожная электрическая стимуляция может использоваться в качестве неинвазивного метода реабилитации спинальной патологии.

Ключевые слова: электрическая стимуляция, спинной мозг, электромиографическая активность, реабилитация, локомоция.

Введение. Широкая распространенность спинномозговых патологий, связанных с травмами и заболеваниями позвоночника, требует поиска новых методов реабилитации двигательных функций. Электрическая стимуляция является одним из наиболее широко распространенных экспериментальных методов в физиологии человека и животных, позволяющих изучать функции различных систем организма. В исследованиях, проведенных на пациентах с патологией спинного мозга и в лабораторных условиях на спинализованных животных, было показано, что

электрическая стимуляция нижнего поясничного отдела спинного мозга прямоугольными биполярными стимулами с частотой 5–30 Гц способна инициировать шагательные движения [2; 14; 15]. Результаты этих исследований подтвердили предположение о том, что программа локомоторной активности у млекопитающих формируется специализированной нейрональной сетью спинного мозга, называемой разными авторами по-разному: спинальным локомоторным генератором, генератором шагательных движений и т.д. [1; 13; 16]. Метод электрической стимуляции спинного мозга электродами, расположенными на дорсальной поверхности мозга (эпидуральная стимуляция), начали использовать в конце прошлого века при лечении патологии спинного мозга различной этиологии [6; 3; 4; 7; 10]. Одним из достижений последних лет

* Исследование поддержано грантами РФФИ №№10-04-01172-а, 11-04-01669-а; 11-04-12073-офи-м-2011, 11-04-12074-офи-м-2011, грантом Президента Российской Федерации МК-5684.2012.4 и Госконтрактом № 16.522.11.2009 Минобрнауки РФ.

стало выявление в спинном мозге определенных зон, электрическая стимуляция которых приводит к появлению функции поддержки веса тела, эти локусы находятся в сакральном отделе спинного мозга [8; 18]. Благодаря этому появилась возможность не только вызывать движения с помощью метода электрической стимуляции спинного мозга, но и управлять вызванными движениями, подстраивать их под требуемые моторные задачи. Другим способом управления локомоцией без использования хирургической имплантации электродов на дорсальную поверхность спинного мозга является неинвазивное воздействие на спинальные генераторы. Однако следует отметить, что при накожном размещении электродов на позвоночнике стимуляция спинного мозга принципиально возможна, но малоэффективна и плохо воспроизводима из-за болезненности стимулов: пороговые значения амплитуды стимулов для вызова движений больше или совпадают с пороговыми значениями болевой чувствительности. Недавно нами был описан оригинальный способ электрической стимуляции спинного мозга с применением сложного по форме электрического стимула, где биполярные низкочастотные импульсы (1–40 Гц) заполнялись высокочастотной составляющей (5–10 кГц). Высокочастотная составляющая стимулов обеспечила увеличение болевых порогов стимуляции и позволила увеличивать интенсивность воздействия до уровня активации структур спинного мозга [9]. Таким образом, появился новый инструмент для исследования спинного мозга человека в норме.

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу эффектов электрической эпидуральной стимуляции (ЭС) и чрескожной электрической стимуляции (ЧЭС) спинного мозга у человека и у кошки. Представлены новые данные, демонстрирующие эффект чрескожной электрической стимуляции поясничного утолщения спинного мозга у децеребрированных и хронически спинализованных кошек. Сопоставление движений, вызванных разными способами воздействий на спинной мозг, позволило оценить их эффективность и обосновать использование чрескожной стимуляции спинного мозга в

нейрореабилитации двигательных функций поврежденного спинного мозга.

Материалы и методы. Методика проведения электрической эпидуральной стимуляции в остром эксперименте на децеребрированных кошках детально нами описана ранее [2; 5]. Эксперименты с применением ЭС и ЧЭС выполнены на острых децеребрированных ($n=4$) и хронически спинализованных кошках ($n=4$) массой от 2,5 до 3 кг. Децеребрированная кошка помещалась в стереотаксическую установку, где фиксировались голова, таз, а также позвоночник в грудном и поясничном отделах. Передние и задние конечности касались движущегося тредбана. Для осуществления ЭС проводилась ламинотомия на уровне T12-L4 и C1-C5. Использовалась монополярная стимуляция спинного мозга. Активный электрод (серебряный, шариковый, диаметром 2 мм) располагался на твердой мозговой оболочке задней поверхности спинного мозга по средней линии. Индифферентный электрод размещался в мышцах спины.

В хронических опытах на кошках были проведены спинализация на Th5-6 и вживление активного эпидурального электрода на поясничное утолщение спинного мозга. Индифферентный электрод размещался подкожно в области спины. Кроме регулярного (2 раза в день) медицинского ухода за парализованными животными (в том числе опорожнение мочевого пузыря и кишечника, разминание и массаж нижних конечностей) проводилась тренировка локомоторных способностей на тредбане в течение 2–3 нед. до регистрации экспериментальных данных [19].

Для ЭС использовался стимулятор А-М System Model 2100, импульсы тока длительностью 0,5 мс, амплитудой 50–200 мкА, частотой 0,3 и 5 Гц. ЧЭС у кошек в остром и хроническом экспериментах (децеребрированное и спинализованное животное соответственно) проводилась на той же электрофизиологической установке. Для накожной электрической стимуляции спинного мозга использовали стимулятор КУЛОН (ГУАП, СПб.), амплитуда стимула составляла от 1 до 10 мА. Электромиографическая активность (ЭМГ) мышц задних конечностей регистрировалась биполярно проволочными электро-

дами, вшитыми в исследуемые мышцы. ЭМГ сигналы усиливались дифференциальным усилителем (А-М Systems Model 1700) в диапазоне от 30 Гц до 10 кГц и оцифровывались с частотой 10 кГц с помощью аналого-цифрового преобразователя фирмы National Instrument с последующим анализом пакетом LabView программ.

Клинические исследования проводились на базе отделения хирургии позвоночника №6 Санкт-Петербургского научно-исследовательского института фтизиопульмонологии. Были исследованы четыре пациента с признаками вертеброгенной прогрессирующей миелопатии. Степень вертеброгенных неврологических нарушений и ее динамику оценивали согласно международным стандартам ASIA (American Spinal Injury Association, 1988). В период исследований использовали авторскую медицинскую технологию лечения миелопатий МЗ РФ ФС-2007/139-у от 2007 г. Для ЭССМ с лечебной целью больным пункционно имплантировались от двух до четырех электродов (Cooner Wire Co., w363A) на дорсальную поверхность твердой мозговой оболочки в разные отделы спинного мозга. ЭССМ с терапевтической целью проводили дважды в день, ежедневно, сеансами по 30 мин, с частотой стимуляции 1–12 Гц на фоне медикаментозной поддержки (церебролизин, кавинтон, мильгамма). Стимуляционную диагностику проводили с помощью тех же эпидуральных электродов. Использовали два вида ЭС. Первый – монополярная стимуляция через каждый из имплантированных электродов, с индифферентным электродом, располагавшимся на кожных покровах паравертебрально. Другой способ – биполярная стимуляция двух сегментов через два электрода. ЭМГ регистрацию и диагностическую ЭС проводили с помощью четырехканального комплекса ЭМГСТ-1 и программы ANDEX. При анализе ЭМГ выделяли поздние ответы с латентными периодами более 10 мс, пачечную ЭМГ активность мышц, являющуюся характеристикой ЭМГ при ходьбе, а также тоническую активность мышц, наблюдаемую в норме в разгибателях при поддержании вертикальной позы.

Эффект ЧЭС спинного мозга у человека был исследован на здоровых испытуемых-добровольцах (6 взрослых испытуемых мужского пола). В соответствии с принципами Хельсинкской декларации было получено информированное письменное согласие испытуемых на участие в экспериментах. Испытуемые располагались на кушетке в положении лежа на левом боку, с ногами, размещенными на отдельных досках, которые были закреплены веревками по типу качелей к крюку в потолке экспериментальной комнаты. При этом правая (верхняя) нога поддерживалась непосредственно в области голени, а левая (нижняя) располагалась на вращающейся шине, прикрепленной к горизонтально ориентированной доске, что обеспечивало максимально возможную амплитуду перемещений ног [9; 17].

Для ЧЭС спинного мозга использовали стимулятор КУЛОН (ГУАП, СПб). Стимулирующий электрод (катод) располагали по средней линии позвоночника на уровне грудных позвонков T11 и T12 между остистыми отростками, индифферентные электроды (аноды) – симметрично на коже над гребнями подвздошных костей. Стимуляцию проводили прямоугольными биполярными стимулами длительностью 0,5 мсек, с несущей частотой 10 кГц; интенсивность стимуляции – 30–100 мА. Частота стимуляции составляла 1, 5, 10, 20, 30, 40 Гц, длительность воздействия колебалась от 10 до 30 с. ЭМГ мышц обеих ног *m. rectus femoris*, *m. biceps femoris*, *m. tibialis anterior* и *m. gastrocnemius* отводили биполярными поверхностными электродами, регистрировали с помощью телеметрического 16-канального электронейромиографа (ME 6000 MegaWin, Финляндия). Движения сгибания-разгибания в коленных суставах регистрировали с помощью гониометров.

Для регистрации кинематических характеристик движений ног использовали видеосистему (Qualisys, Швеция). Угловые перемещения в суставах вычисляли по положениям светоотражающих маркеров, прикрепленных к точкам тела по осям движения в плечевом, тазобедренном, коленном и голеностопном суставах. Реконструкцию движений одного шага-

тельного цикла производили с помощью оригинальной программы.

Регистрации ЭМГ и кинематических параметров шагания были синхронизированы. Среднюю величину периода шагательного цикла и амплитуду угловых перемещений суставов ног определяли за 10–12 циклов.

Статистическую обработку данных производили с применением пакета стандартных компьютерных программ. Для определения статистически значимых различий использовался t-критерий Стьюдента при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. Было установлено, что у децеребрированных кошек оба вида стимуляции (ЭС и ЧЭС) с частотой 5 Гц

в области пояснично-крестцового утолщения способны инициировать локомоторную активность в задних конечностях. Следует отметить, что стимулирующий ток и величина порога при ЧЭС были в десятки раз выше, чем при ЭС, что объясняется необходимостью проникновения тока через кожу и костные позвонки и меньшей селективностью ЧЭС. Локомоция при ЧЭС отличалась от ЭС меньшей координацией и стабильностью, однако общий рисунок локомоторного паттерна, реципрокность активации мышц-антагонистов, а также одноименных мышц правой и левой конечности были схожими при ЧЭС и эпидуральной стимуляции (рис. 1).

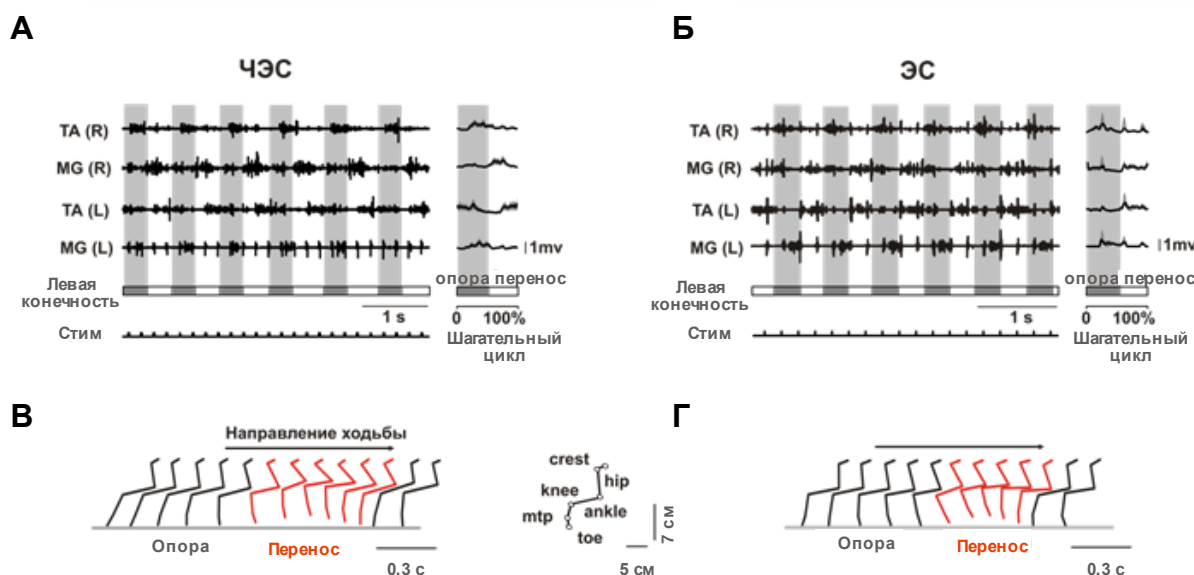


Рис. 1. Локомоторная активность, вызванная чрескожной (ЧЭС) и эпидуральной (ЭС) стимуляцией спинного мозга у децеребрированных кошек (А, В и Б, Г соответственно).

Частота стимуляции – 5 Гц. А, Б – ЭМГ активность во флексорах (ТА – *m. tibialis anterior*) и экстензорах (МГ – *gastrocnemius medialis*) правой (R) и левой (L) конечностей; Стим – стимул; опора, перенос – фазы движения конечности; справа показаны усредненные ($n=8-10$ циклов шага) и выпрямленные миографические сигналы во время фаз опоры и переноса локомоторного цикла. В, Г – кинематика движений при вызванной ходьбе; положение отражателей на подвздошном гребне (crest), тазобедренном (hip), коленном (knee), голеностопном (ankle), плюснефаланговом (mtp) суставах и на первом пальце стопы (toe)

В серии экспериментов на хронических спинализированных кошках с применением эпидуральной стимуляции и ЧЭС с частотой 5 Гц было показано, что ЧЭС, как и эпидуральная стимуляция, способна активировать спинальные нейронные сети и участвовать в восстановлении локомоторной функции после повреждения спинного мозга (рис. 2). Следует отметить, что координация локомо-

торной активности у хронических спинальных животных была существенно хуже, чем у децеребрированных кошек в остром эксперименте. Локомоторные паттерны у спинальных кошек при эпидуральной стимуляции и ЧЭС принципиально были схожи и демонстрировали реципрокность работы экстензоров и флексоров и межконечностную координацию (рис. 2).

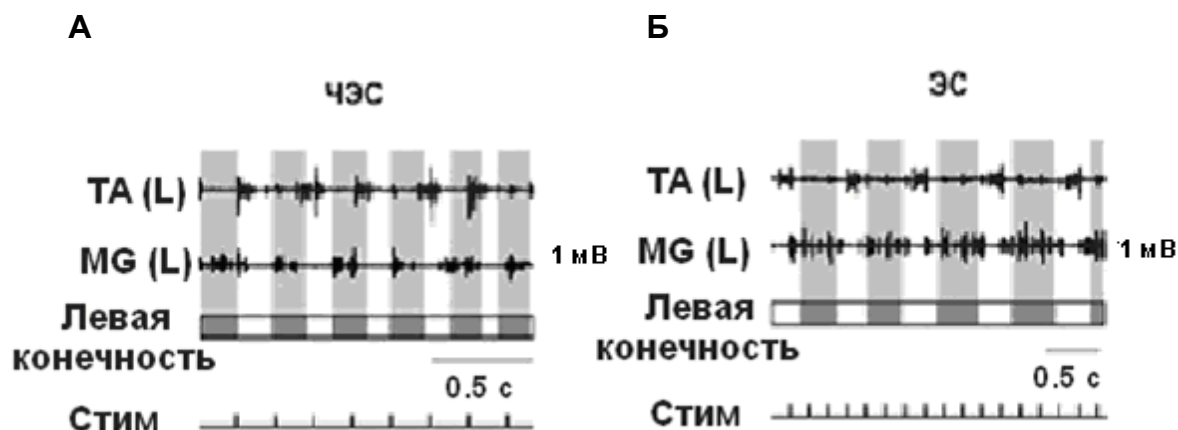


Рис. 2. Локомоторная активность, вызванная чрескожной (ЧЭС) и эпидуральной (ЭС) стимуляцией спинного мозга спинальных кошек (А и Б соответственно); приведены для сравнения. Обозначения как на рис. 1

Таким образом, в условиях острого и хронического экспериментов на децеребрированных и спинализованных животных неинвазивная ЧЭС способна вызывать локомоторную активность так же, как и эпидуральная стимуляция спинного мозга. Сходство локомоторных паттернов при ЧЭС и эпидуральной стимуляции позволяет говорить о схожих механизмах регуляции двигательных эффектов при этих двух методах воздействия на спинной мозг.

Эффект эпидуральной стимуляции спинного мозга у человека был исследован у больных с различной вертебро-спинальной патологией [10], сравнивали эффекты монополярной и биполярной стимуляции спинного мозга. Показано, что характеристики вызванных движений зависят от степени поражения спинного мозга. При неполном поражении значительно легче вызывается пачечная ЭМГ активность, которая является признаком шагательных движений. Зарегистрированы различия в структуре ЭМГ ответов у пациентов с пlegией и парезом нижних конечностей (рис. 3). У пациентов с пlegией при биполярной стимуляции в *m. quadriceps* возникали только ранние ответы, а в *m. gastrocnemius* – ранние и поздние ответы (рис. 3А). Аналогичная стимуляция у пациента с парезом инициировала шагоподобные движения, сопровождающиеся пачечной ЭМГ активностью в *m. quadriceps*, а

в *m. gastrocnemius* регистрировался четко выраженный ранний компонент, за которым следовала пачка ЭМГ активности (рис. 3Б). ЭМГ пачки не зависели от стимулов, что особенно хорошо проявлялось при усреднении ответов. Во всех случаях биполярная стимуляция двух сегментов спинного мозга оказывалась более эффективной, чем монополярная стимуляция.

При определенных условиях эпидуральная стимуляция спинного мозга была способна инициировать ритмическую ЭМГ активность в мышцах ног у пациентов с клинически полным перерывом спинного мозга [11], характеристики которой соответствовали шагательным движениям. На рис. 4 представлен ритмический шагательный ЭМГ паттерн, вызванный эпидуральной стимуляцией в области L2 сегмента спинного мозга. Особенностью такого шагательного паттерна является реципрокная работа мышц-антагонистов бедра и голени. Полученные результаты свидетельствуют, что эпидуральная стимуляция в «изолированном» от супраспинальных влияний спинном мозге человека способна активировать нейрональную локомоторную сеть (генератор шагания), вызывая произвольные шагательные движения. Этот результат открывает новые возможности для использования эпидуральной стимуляции в нейрореабилитации двигательных функций.

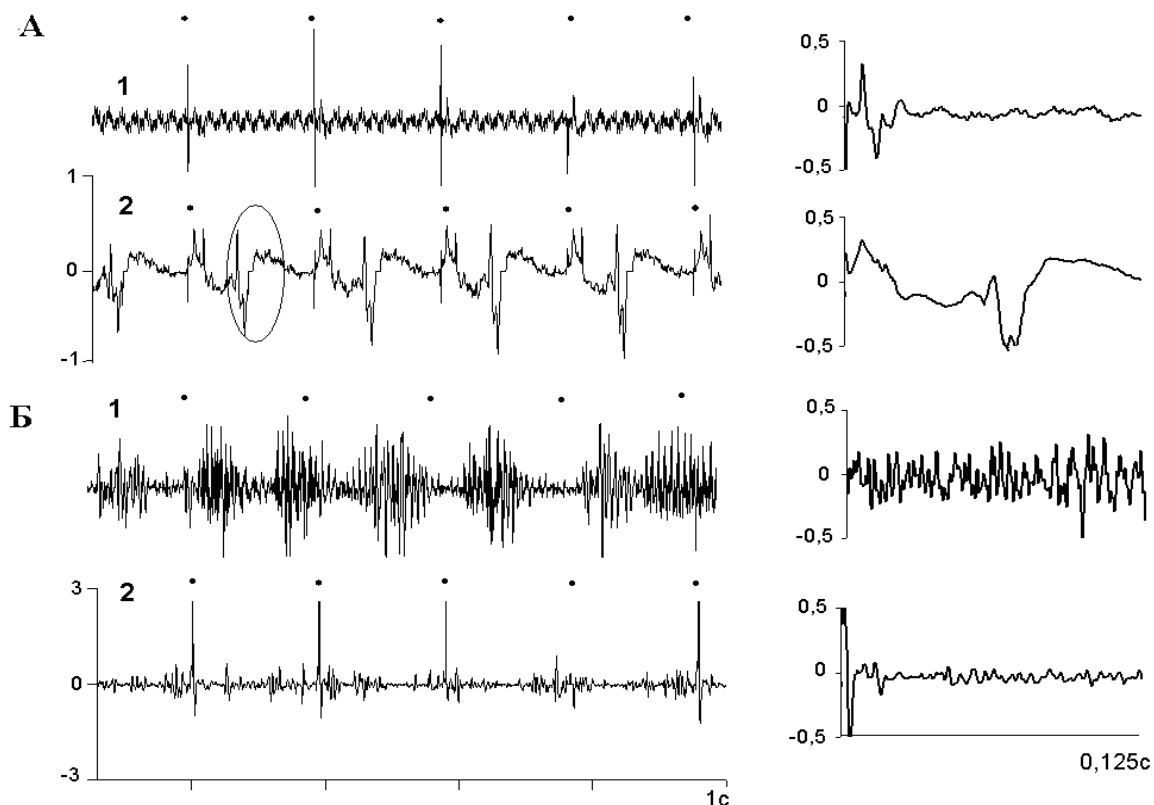


Рис. 3. Локомоторная активность, вызванная эпидуральной стимуляцией спинного мозга человека (цит. по [8]). Биполяная стимуляция L2 и S2 сегментов спинного мозга с частотой 5 Гц на четвертой неделе лечения пациентки (А) и на третьей неделе лечения пациентки (Б). Слева – ЭМГ активность в m. quadriceps rect. (1), m. gastrocnemius lat. (2). Справа – усредненные ЭМГ ответы (справа, n=25). По оси ординат – амплитуда в мВ. Точками показаны отметки стимула. На кривой А2 выделен поздний ответ

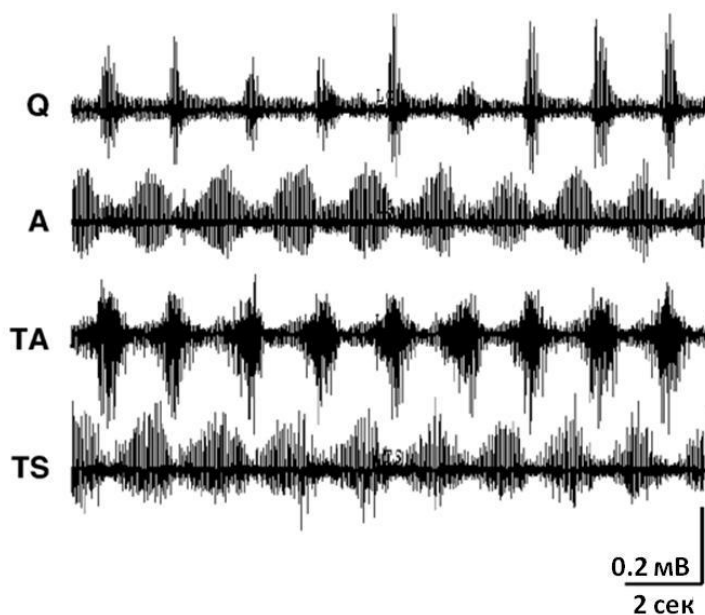


Рис. 4. Локомоторный ЭМГ паттерн в мышцах ног, вызванный эпидуральной стимуляцией спинного мозга у пациента с клинически полным перерывом спинного мозга (ASIA A), находящегося в положении лежа на спине. Ритмическая ЭМГ активность вызывалась при ЭССМ на уровне L2 сегмента спинного мозга с частотой 30 Гц. ЭМГ регистрировали в мышцах quadriceps (Q); adductors (A); tibialis anterior (TA); triceps surae (TS)

Эффект ЧЭС спинного мозга у человека был исследован на здоровых испытуемых-добровольцах [9]. ЧЭС с частотой 1 Гц вызывала в мышцах ног рефлекторные ответы, порог вызова которых составлял 70–80 мА (рис. 5). При увеличении интенсивности стимула первыми в двигательный ответ вовлекались мышцы бедра (*m. rectus femoris* и *m. biceps femoris*), а затем – мышцы голени (*m. tibialis anterior* и *m. gastrocnemius*) (рис. 5Б). Ответ на каждый стимул состоит из

ранних моносинаптических ответов с латентным периодом около 12–15 мс, при увеличении интенсивности стимула в двуглавой мышце бедра (мышца-сгибатель) были зарегистрированы поздние ответы с латентным периодом в несколько десятков миллисекунд, которые являются, по-видимому, полисинаптическими. Таким образом, при низкочастотной (1 Гц) ЧЭС были зарегистрированы рефлекторные ответы в мышцах ног с моно- и полисинаптическими компонентами.

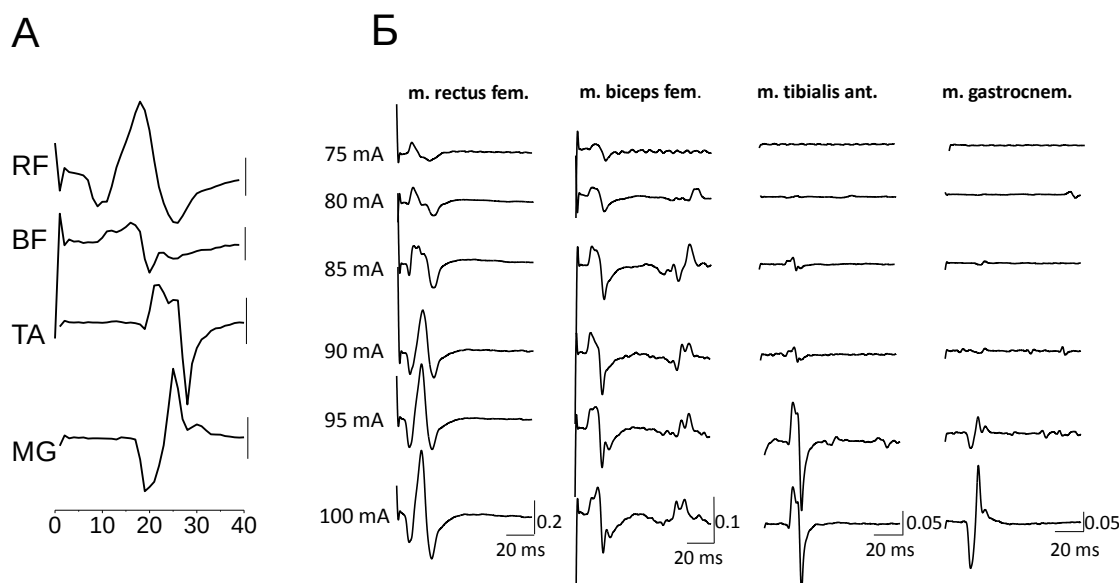


Рис. 5. Локомоторная активность, вызванная ЧЭС спинного мозга человека (цит. по [4]). Частота – 1 Гц. А – динамика возникновения рефлекторных ответов при субмаксимальной стимуляции. Б – зависимость амплитуды ответов от величина стимула. RF и BF – прямая и двуглавая мышцы бедра соответственно; TA и GM – передняя большеберцовая и икроножная мышцы голени соответственно. Внизу справа от нижних записей – отметки амплитуды в мВ и одинаковые для всех мышц отметки времени

ЧЭС с частотой 5–40 Гц у пяти испытуемых из шести вызывала произвольные движения ног (рис. 6). Исследованные зависимости характеристик вызванных шагательных движений от частоты стимуляции показали, что частота вызванных движений не зависела от частоты стимуляции.

Таким образом, показано, что у человека ЧЭС способна вызывать локомоторную активность так же, как и эпидуральная стимуляция спинного мозга у лабораторных животных и спинальных пациентов. В ряде случаев эпидуральная стимуляция спинного мозга у больных не вызывала выраженных локомоторных движений, что может быть связано

с особенностями патологии конкретных больных, на которых проводили исследования, а также с условиями, при которых проводили стимуляцию.

Пациенты лежали на больничной кровати на спине, ноги больных также лежали полностью на кровати. При этом в ЭМГ активности некоторых из пациентов были отмечены ответы, сходные с теми, что регистрируют при локомоции. Все локомоторные ответы на ЧЭС у здоровых испытуемых получены при положении испытуемых лежа на боку, в условиях внешней вывески ног, когда ничто не ограничивает вызываемых движений.

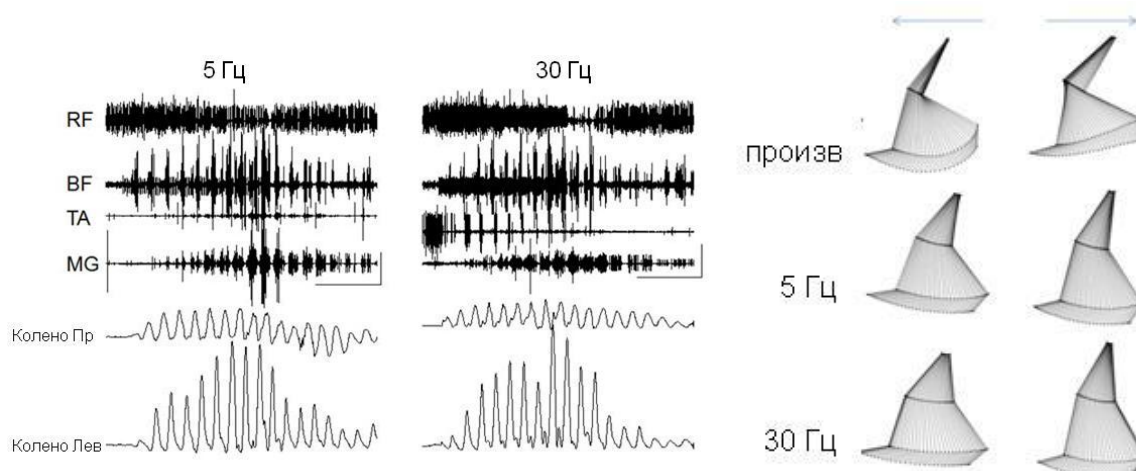


Рис. 6. Локомоторная активность, вызванная ЧЭС спинного мозга человека.

Частота – 5 и 30 Гц. Слева – ЭМГ активность мышц правой ноги и кинематограммы движений в коленном суставе правой (R) и левой (L) ног. RF – m. rectus femoris; BF – m. biceps femoris; TA – tibialis anterior; MG – m. gastrocnemius; длительность записей – 40 сек. Справа – реконструкции движений ног в суставах при произвольных (voluntary) и вызванных движениях (5 и 30 Гц), а также циклограмма движений в коленном и голеностопном суставах

Недавно опубликован случай, демонстрирующий, что эпидуральная электрическая стимуляция спинного мозга у человека (больной с полным моторным поражением спинного мозга) может вызывать локомоторные движения [12]. В упомянутом случае больной находился в вертикальном положении, в подвеске, обеспечивающей частичную компенсацию веса тела, ноги больного опирались на движущуюся ленту тредбана. Таким образом, можно считать доказанным, что эпидуральная стимуляция и ЧЭС у человека могут вызывать локомоторные движения. Так же, как и у животных, у человека сходство рефлекторных ответов и основных характеристик локомоторной активности при ЧЭС и эпидуральной стимуляции позволяет говорить о схожих механизмах регуляции двигательных эффектов при этих двух методах воздействия на спинной мозг. Таким образом, неинвазивная ЧЭС стимуляция, несмотря на другой вид стимула и другое место приложения стимула в сравнении с эпидуральной электрической стимуляцией, возбуждает те же самые структуры, что и эпидуральная стимуляция. В последние годы опубликовано много работ, выполненных на лабораторных животных, с использованием метода эпидуральной стимуляции, открывающих хорошие перспективы использования электрической

стимуляции спинного мозга для лечения болезней спинного мозга, обусловленных утратой супраспинального контроля или нарушением связей на протяжении спинного мозга [15]. Возможность применения неинвазивной чрескожной стимуляции вместо трудоемкой и инвазивной эпидуральной стимуляции приближает перспективу использования электрической стимуляции спинного мозга в рутинной клинической практике, в устройствах типа «мозг-компьютер-интерфейс» и очувствленных протезах.

1. Герасименко, Ю.П. Спинальные механизмы регуляции двигательной активности в отсутствие супраспинальных влияний : автореф. ... дис. д-ра биол. наук / Ю.П. Герасименко. – СПб., 2000. – С. 180.
2. Инициация локомоторной активности спинализированной кошки при эпидуральной стимуляции спинного мозга / Ю.П. Герасименко и др. // Физиологический журн. им. И.М. Сеченова. – 2001. – 87 (9). – С. 1161–1170.
3. Исагулян, Э.Д. Хроническая стимуляция спинного мозга в лечении неврогенных болевых синдромов / Э.Д. Исагулян, В.А. Шабалов // Боль. – 2007. – №2. – С. 2–10.
4. Макаровский, А.Н. Эпидуральная электростимуляция спинного мозга в реконструктивно-пластической хирургии при туберкулезном спондилите / А.Н. Макаровский, А.Е. Гарбуз, Ю.П. Герасименко // Проблемы туберкулеза. – 1994. – №3. – С. 32–34.

5. Мусиенко, П.Е. Значение периферической обратной связи в генерации шагательных движений при эпидуральной стимуляции спинного мозга / П.Е. Мусиенко, И.Н. Богачева, Ю.П. Герасименко // Российский физиологический журн. им. И.М. Сеченова. – 2005. – 95 (12). – С. 1407–1420.
6. Перспективы применения электростимуляции спинного мозга при комплексном лечении миелодисплазии у детей / Г.М. Еликбаев и др. // Вестн. восстановительной медицины. – 2008. – №4. – С. 16–21.
7. Применение метода хронической эпидуральной стимуляции спинного мозга в лечении болевых нейропатических синдромов: начальный опыт / Д.А. Рзаев и др. // Травматология и ортопедия России. – 2010. – №2. – С. 68–71.
8. Заявка Ru 2418319 Российская Федерация. Способ моделирования и обучения лечению больных с хроническим поражением спинного мозга [Текст] / Ю.П. Герасименко и др. – Заявл. 10.05.2011; приоритет 21.04.2008.
9. Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга: неинвазивный способ активации генератора шагательных движений у человека / Р.М. Городничев и др. // Физиология человека. – 2012. – Т. 38, №2. – С. 4.
10. Эффекты электрической стимуляции спинного мозга у пациентов с вертебро-спинальной патологией / Т.Р. Мошонкина и др. // Бюл. экспериментальной биологии и медицины. – 2012. – Т. 153, №1. – С. 21–26.
11. Dimitrijevic, M. Evidence for a spinal central pattern generator in humans / M. Dimitrijevic, Yu. Gerasimenko, M. Pinter // Ann. NY Acad. Sci. – 1998. – Vol. 860. – P. 360.
12. Effect of epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: a case study / S. Harkema et al. // Lancet. – 2011. – Vol. 377. – P. 1938–1947.
13. Grillner, S. Locomotion in spinal cat // Control of posture and locomotion / S. Grillner; eds. R.B. Stein et al. – New York: Plenum, 1973. – P. 513–535.
14. Hindlimb stepping movements in complete spinal rats induced by epidural spinal cord stimulation / R.M. Ichiyama et al. // Neurosci Lett. – 2005. – Vol. 383. – P. 339–344.
15. Recovery of control of posture and locomotion after a spinal cord injury: solutions staring us in the face / A.J. Fong et al. // Prog. Brain Res. – 2009. – P. 393–418.
16. Shik, M.L. Neurophysiology of locomotor automatism / M.L. Shik, G.N. Orlovsky // Physiol. Rev. – 1976. – Vol. 56. – P. 456–501.
17. Tonic central and sensory stimuli facilitate involuntary air-stepping in humans / V.A. Selionov et al. // J. Neurophysiol. – 2009. – Vol. 101. – P. 2847.
18. Transformation of nonfunctional spinal circuits into functional states after the loss of brain input / G. Courtine et al. // Nature Neuroscience. – 2009. – Vol. 12 (10). – P. 1333–1342.
19. Weight-bearing hindlimb stepping in treadmill-exercised adult spinal cats / R.G. Lovely et al. // Brain Res. – 1990. – Vol. 514. – P. 206–218.

REGULATION OF LOCOMOTOR ACTIVITY BY EPIDURAL AND TRANSCUTANEOUS ELECTRICAL SPINAL CORD STIMULATION IN THE HUMAN AND ANIMALS

T.R. Moshonkina¹, P.E. Musienko¹, I.N. Bogacheva¹, N.A. Scherbakova¹,
O.A. Nikitin¹, A.A. Savochin¹, A.N. Makarovskiy², R.M. Gorodnichev³, Y.P. Gerasimenko¹

¹I.P. Pavlov Institute of Physiology RAN, St.-Petersburg,

²St.-Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology,

³Velikie Luky State Academy of Physical Education and Sport

Comparative analysis of motor activity induced by electrical epidural stimulation (EES) and transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord (TES) both in human and animals has been performed. ESS of lumbar spinal cord by rectangular bipolar impulses with frequency from 5 to 30 Hz initiated step-like movements in decerebrated and spinal animals as well as in individuals with pathology of the spinal cord. It was found that continuous TES over T11-T12 vertebrae by impulses filled with a carrier frequency of 10 kHz induced involuntary locomotor-like stepping hindlimb movements in subjects with their legs in a gravity-neutral position. New data demonstrating the effects of TES at lumbosacral enlargement in decerebrated and chronic spinal cats are shown. Similar locomotor patterns produced by EES and TES allows to suggest the comparable mechanisms of their regulation. It has been suggested that TES can be used as a non-invasive method in rehabilitation of spinal pathology.

Keywords: electrical stimulation, EMG activity, spinal cord, rehabilitation, locomotion.