

Регуляция дыхания при электрической стимуляции поясничного отдела спинного мозга у человека

Т. Р. Мошонкина¹, Н. А. Щербакова^{✉1}, С. А. Моисеев², А. В. Миняева³, Ю. П. Герасименко¹

¹ Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6

² Великолукская государственная академия физической культуры и спорта,
182100, Россия, г. Великие Луки, Юбилейная пл., д. 4

³ Тверской государственный университет, 170100, Россия, г. Тверь, ул. Желябова, д. 33

Сведения об авторах

Татьяна Ромульевна Мошонкина,
SPIN-код: 8537-6871,
Scopus AuthorID: 6506810155,
e-mail: moshonkina@infran.ru

Наталья Александровна
Щербакова, SPIN-код: 6796-0793,
e-mail: chsherbakovana@infran.ru

Сергей Александрович Моисеев,
SPIN-код: 7557-5559,
e-mail: siranovl@yandex.ru

Арина Владимировна Миняева,
SPIN-код: 5091-7865,
e-mail: Minyayeva.AV@tversu.ru

Юрий Петрович Герасименко,
SPIN-код: 1433-9271,
Scopus AuthorID: 7003598492,
e-mail: gerasimenko@infran.ru

Для цитирования:

Мошонкина, Т. Р.,
Щербакова, Н. А.,
Моисеев, С. А.,
Миняева, А. В.,
Герасименко, Ю. П. (2020)
Регуляция дыхания при
электрической стимуляции
поясничного отдела спинного
мозга у человека. *Интегративная
физиология*, т. 1, № 2, с. 108–114.
DOI: 10.33910/2687-1270-2020-1-
2-108-114

Получена 9 декабря 2019;
прошла рецензирование
29 января 2020;
принята 31 января 2020.

Финансирование: Поддержано
Программой Президиума РАН
П.42 (проект 0134-2018-0001).

Права: © Авторы (2020).
Опубликовано Российским
государственным педагогическим
университетом им. А. И. Герцена.
Открытый доступ на условиях
лицензии CC BY-NC 4.0.

Аннотация. Работа продолжает исследование механизмов регуляции вентиляторной реакции на чрескожную электрическую стимуляцию спинного мозга (ЧЭССМ), вызывающую локомоторный ответ. Сравнивали реакции дыхательной системы здоровых добровольцев на ЧЭССМ на уровне T12-L1 позвонков, производимую на фоне произвольных и пассивных движений ногами с равными амплитудно-скоростными параметрами, а также при внешнем сдерживании вызываемого ЧЭССМ локомоторного ответа, что позволяло модулировать вклад нейрогенного механизма регуляции дыхания в вентиляторную реакцию. Для исследований использовали реабилитационный механотренажер. ЧЭССМ с интенсивностью, вызывающей мышечный ответ, в условии внешнего торможения движений ног вызывала уменьшение глубины дыхания на $0,10 \pm 0,03$ л за счет незначительного, но синхронного уменьшения продолжительности и скорости как вдоха, так и выдоха. Стимуляция на фоне совершения испытуемыми активных движений ногами сопровождалась достоверным увеличением минутного объема вентиляции легких на $3,23 \pm 1,06$ л/мин за счет прироста глубины дыхания на $0,10 \pm 0,03$ л. Респираторная реакция на ЧЭССМ на фоне пассивных движений была слабо выражена, однако прослеживалась тенденция к увеличению частоты и снижению глубины дыхания, было отмечено достоверное повышение потребления кислорода на $33,10 \pm 13,16$ мл/мин. На фоне выполнения пассивных движений эффекты ЧЭССМ и механизмов регуляции дыхания при мышечной деятельности оказываются практически сбалансированными. Выявленные различия в респираторных реакциях на ЧЭССМ, скорее всего, связаны с наложением разнонаправленных эффектов стимуляции поясничного утолщения спинного мозга, с одной стороны, и комплекса нейрогенных и гуморально-рефлекторных механизмов регуляции дыхания при физической работе, с другой стороны.

Ключевые слова: человек, чрескожная электростимуляция спинного мозга, дыхание, вызванные шагательные движения, вентиляция легких, газообмен.

Regulation of respiration during electrical stimulation of the lumbar spinal cord in humans

T. R. Moshonkina¹, N. A. Scherbakova^{✉1}, S. A. Moiseev², A. V. Minyaeva³, Yu. P. Gerasimenko¹

¹ Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6 Makarova Emb., Saint Petersburg 199034, Russia

² Velikiye Luki State Academy of Physical Culture and Sports, 4 Yubilejnaya Square, Velikiye Luki 182100, Russia

³ Tver State University, 33 Zheliabova Str., Tver 170100, Russia

Authors

Tatyana R. Moshonkina,
SPIN: 8537-6871,

Scopus AuthorID: 6506810155,
e-mail: moshonkina@infran.ru

Natalia A. Scherbakova,
SPIN: 6796-0793,
e-mail: chsherbakovana@infran.ru

Sergey A. Moiseev,
SPIN: 7557-5559,
e-mail: siranovl@yandex.ru

Arina V. Minyaeva,
SPIN: 5091-7865
e-mail: Minyaeva.AV@tversu.ru

Yuri P. Gerasimenko,
SPIN: 1433-9271,
Scopus AuthorID: 7003598492,
e-mail: gerasimenko@infran.ru

For citation: Moshonkina, T. R., Scherbakova, N. A., Moiseev, S. A., Minyaeva, A. V., Gerasimenko, Yu. P. (2020) Regulation of respiration during electrical stimulation of the lumbar spinal cord in humans. *Integrative Physiology*, vol. 1, no. 2, pp. 108–114.
DOI: 10.33910/2687-1270-2020-1-2-108-114

Received 9 December 2019;
reviewed 29 January 2020;
accepted 31 January 2020.

Funding: This research was supported by the Presidium of the Russian Academy of Sciences Program PL42 (project 0134-2018-0001).

Copyright: © The Authors (2020).
Published by Herzen State Pedagogical University of Russia.
Open access under
CC BY-NC License 4.0.

Abstract. The current research is a continuation of our recent study devoted to the regulation mechanisms of the human respiratory system reaction to transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord (tSCS), which causes a locomotor response. With healthy volunteers serving as the subjects in our experiment, we compared the respiratory system reactions to tSCS in the area of T12-L1 vertebrae, which was performed during the voluntary and passive leg movements with equal amplitude and speed parameters, with the reaction under the conditions of external suppression of the locomotor response caused by tSCS, which made it possible to modulate the contribution of the neurogenic mechanism of respiration regulation to the ventilatory reaction. A rehabilitation biomechanical simulator was used for this investigation. Our experiments showed that tSCS with an intensity that induced muscle response under the conditions of external restraint of leg movements causes a decrease in the depth of breathing by 0.10 ± 0.03 l due to an insignificant, but synchronous decrease in the duration and speed of both inspiration and exhalation. Stimulation during voluntary leg movement was accompanied by a significant increase in the minute volume of the ventilation of the lungs by 3.23 ± 1.06 l/min. due to an increase in the depth of breathing by 0.10 ± 0.03 l. The respiratory reaction to tSCS during passive leg movement was weak, but there was a tendency towards an increase in the frequency and a decrease in the depth of breathing with a marked increase in oxygen consumption by 33.10 ± 13.16 ml/min. In case of the passive leg movement, the effects of tSCS and the mechanisms of respiration regulation during muscular activity were almost coherent. The revealed differences in respiratory reactions to tSCS are most likely associated with the imposition of multidirectional effects of stimulation of the lumbar areas of the spinal cord, on the one hand, and a complex of neurogenic and humoral-reflex mechanisms of breathing regulation during physical work, on the other.

Keywords: human, transcutaneous stimulation of the spinal cord, respiration, involuntary stepping movements, lung ventilation, gas exchange.

Введение

Ранее было показано, что у здоровых добровольцев в положении лежа на боку с внешней поддержкой ног чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга (ЧЭССМ) в проекции T11-T12 позвонков с параметрами стимуляции, инициирующими шагательные дви-

жения, оказывает влияние на респираторную функцию. Действие ЧЭССМ проявляется в увеличении частоты дыхания (за счет сокращения длительности выдоха) и уменьшении глубины дыхания (Миняева, Герасименко, Моисеев и др. 2016; Миняева, Моисеев, Пухов и др. 2017). Сравнительный анализ вентиляции легких при ЧЭССМ, вызывавшей шагательные движе-

ния малой и большой амплитуды, выявил сходную динамику параметров вентиляции легких у испытуемых с низкой и высокой способностью к локомоторному ответу на ЧЭССМ. Отличалась только выраженность наблюдаемых респираторных реакций (Миняева, Моисеев, Пухов и др. 2019). На основании полученных результатов было сделано предположение о том, что вызывающая локомоцию ЧЭССМ может оказывать воздействие на спонтанную вентиляцию легких за счет трех факторов: (1) нейрогенного компонента, связанного с мышечной активностью при шагательных движениях (Бреслав, Волков, Тамбовцева 2013), (2) прямой активации абдоминальной экспираторной мускулатуры, обусловленной расположением референтных стимулирующих электродов над гребнями подвздошных костей и использованием биполярных импульсов для стимуляции, и (3) стимуляции спинальных центров, участвующих в регуляции дыхания (Исаев, Герасименко 2005).

В настоящем исследовании сравнивали реакции дыхательной системы на ЧЭССМ, производимую на фоне произвольных и пассивных движений с равными амплитудно-скоростными параметрами, а также при механическом сдерживании инициируемых ЧЭССМ движений ног, что позволяло модулировать вклад нейрогенного механизма регуляции дыхания в вентиляторную реакцию (Бреслав, Волков, Тамбовцева 2013). Для ЧЭССМ использовали монополярные импульсы, что позволяло снизить эффект прямой активации абдоминальной экспираторной мускулатуры. Таким образом, были созданы условия для исследования влияния вызывающей локомоторный ответ ЧЭССМ спинальных дыхательных центров (Исаев, Герасименко 2005) на спонтанное дыхание.

Материалы и методы

В группу испытуемых входили шесть мужчин — студентов и сотрудников Великолукской академии физической культуры и спорта (ВЛГАФК). Средний возраст испытуемых составлял $20,2 \pm 0,96$ года, индекс массы — $22,4 \pm 0,45$ кг/м². На проведение исследования было получено разрешение комитета по этике ВЛГАФК. В соответствии с принципами Хельсинкской декларации испытуемыми было оформлено письменное информированное согласие на участие в исследовании.

Для регистрации показателей вентиляции легких и газообмена использовали метабологграф Cosmed Quark CPET (Италия). Определяли значения минутного объема вентиляции легких

(VE, л/мин), дыхательного объема (VT, л), частоты дыхания (Rf, цикл/мин), времени вдоха (Ti, с) и выдоха (Te, с), скорости вдоха (VT/Ti, мл/с) и выдоха (VT/Te, мл/с), минутного объема потребления кислорода (VO₂, мл/мин), дыхательного коэффициента (RQ), парциального давления кислорода (PetO₂, мм рт. ст.) и углекислого газа (PetCO₂, мм рт. ст.) в альвеолярном газе, оксигенации артериальной крови (SpO₂, %).

Для регистрации электрической мышечной активности использовали телеметрический 16-канальный электронейромиограф (ME 6000 MegaWin, Финляндия). Электромиограммы большеберцовой и икроножной мышц правой и левой ног регистрировали с помощью одноразовых ЭКГ-электродов с адгезивной поверхностью диаметром 30 мм (ARBO, H124SG). Для анализа мышечной активности ЭМГ-сигнал инвертировали и считали среднюю величину мышечного ответа (m. tibialis, m. gastrocnemius).

Для регистрации кинематических характеристик движений ног использовали видеосистему (Qualisys, Швеция). По динамике изменения углов тазобедренного, коленного и голеностопного суставов рассчитывали скорость, амплитуду и частоту перемещения ног.

Для ЧЭССМ использовали стимулятор «Биостим-5» (ООО «Косима») (Гришин, Мошонкина, Солопова и др. 2016). Применяли кожные электроды с адгезивной токопроводящей поверхностью (Lead-Lok, Sand point, США). Круглые катоды диаметром 2,5 см устанавливали между T12-L1 позвонками, прямоугольные аноды площадью 5×10 см² симметрично располагали над гребнями подвздошных костей. Ритмическую непрерывную стимуляцию с частотой 30 Гц выполняли монополярными импульсами длительностью 1 мс, заполненными модулированной частотой 5 кГц. Интенсивность ЧЭССМ подбирали индивидуально, ориентируясь на минимальную пороговую силу одиночных монополярных импульсов длительностью 1 мс и частотой 1 импульс в 2–3 сек, вызывавшую двигательный ответ во всех регистрируемых мышцах. Для непрерывной стимуляции использовали надпороговые по силе импульсы, вызывающие у испытуемых мышечный ответ при отсутствии неприятных ощущений. Рабочий диапазон токов составил 30–90 мА.

Испытуемые находились в положении полулежа в механотренажере «Биокин-ЭС» (ООО «Косима») (Гришин, Мошонкина, Боброва и др. 2019), предназначенном для реабилитации двигательных функций. Ноги испытуемых были закреплены в области голеностопов полу-

жесткими фиксаторами к кареткам, параллельно перемещающимся по направляющим. Тренажер позволял испытуемым самостоятельно выполнять активные, имитирующие ходьбу на месте движения ногами, а также мог обеспечивать эти движения за счет электромеханических приводов (рис. 1).



Рис. 1. Условия исследования. Положение испытуемого в тренажере

Fig. 1. Study conditions. The position of the subject in the biomechanical simulator

Перед началом исследования у испытуемых, находящихся в тренажере с выпрямленными ногами, 5 мин регистрировали параметры дыхания в состоянии покоя.

Затем последовательно проводили три серии исследования: 1) испытуемые, лежа спокойно, не препятствуя и не помогая движениям ног, вызываемым ЧЭССМ, решали в уме арифметические задачи (из трехзначного числа отнимать двузначное); 2) произвольно выполняли поочередные движения ногами на максимально возможную амплитуду с комфортной скоростью; 3) лежа спокойно, не препятствовали и не помогали пассивным движениям ног, которые задавал тренажер. Во всех трех сериях исследования был одинаковый порядок включения ЧЭССМ: респираторные и двигательные параметры регистрировали на протяжении 1 мин без стимуляции, затем 30 сек при ЧЭССМ на уровне T12-L1. Индивидуально подобранная интенсивность ЧЭССМ для каждого испытуемого во всех сериях была одинаковой. Амплитудно-скоростные характеристики произвольных и пассивных движений практически не различались, амплитуда составляла соответственно $0,44 \pm 0,014$ м, скорость $0,16 \pm 0,03$ м/с.

При статистическом анализе дыхательных и двигательных параметров были рассчитаны среднее арифметическое и ошибка среднего арифметического. Достоверность различий между значениями параметров оценивали с ис-

пользованием непараметрического критерия Уилкоксона. Различия считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты исследований и обсуждение

Дыхание в покое у всех испытуемых имело нормопноический паттерн. Продолжительность выдоха была больше, чем продолжительность вдоха, осуществлявшегося с достоверно большей скоростью, чем выдох. Показатели вентиляции легких и газообмена не выходили за границы референтных значений, однако присутствовали некоторые признаки гипервентиляции. Так, парциальное напряжение кислорода в последней порции выдыхаемого воздуха было несколько выше, а содержание углекислого газа было ниже нормальных значений, что, вероятнее всего, было проявлением предстартовой эмоциональной гипервентиляции.

В 1-й серии ЧЭССМ движения ног практически не вызывала. Это связано с тем, что голеностопы были зафиксированы в каретках тренажера и движениям ног препятствовали как тяжесть кареток, так и трение, с которым каретки перемещались по направляющим. В этих условиях вызвать произвольные движения ног, применяя ЧЭССМ с параметрами, использованными в предыдущих исследованиях, когда ноги были подвешены в независимых качелях и качели компенсировали силу тяжести (Миняева, Герасименко, Моисеев и др. 2016; Миняева, Моисеев, Пухов и др. 2017), было затруднительно (рис. 2).

Несмотря на то, что в 1-й серии исследования ЧЭССМ практически не вызывала видимых движений ног, суммарная амплитуда ЭМГ активности мышц голени достоверно увеличилась. В отдельных случаях проявлялась пачечная активность (рис. 2). То есть можно предположить, что локомоторный ЭМГ паттерн возникал в статическом режиме.

ЧЭССМ в состоянии покоя вызывала достоверное уменьшение глубины дыхания на $0,10 \pm 0,03$ л за счет незначительного, но синхронного уменьшения продолжительности и скорости как вдоха, так и выдоха (рис. 3). Поскольку компенсаторное повышение частоты дыхания было слабо выражено, минутный объем вентиляции легких несколько снизился.

Таким образом, изменения параметров дыхания испытуемых под действием ЧЭССМ в условиях механического сдерживания движений ног практически совпадают с респираторными реакциями на ЧЭССМ в условиях внешней

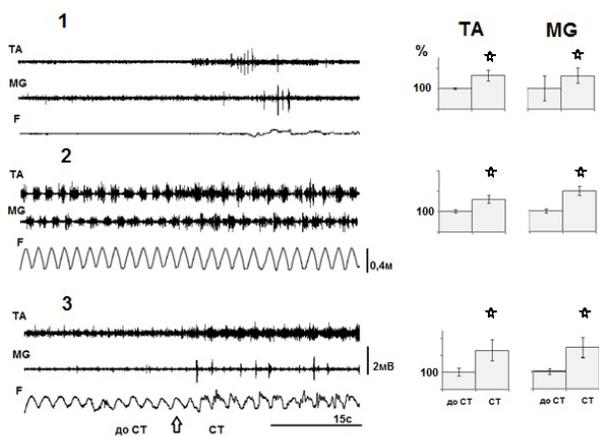


Рис. 2. Изменения ЭМГ активности мышц tibialis anterior (TA) и medial gastrochemius (MG) и амплитуды движений большого пальца правой ноги (F) при ЧЭССМ на фоне состояния покоя (1), при произвольных (2) и пассивных (3) движениях.

Слева — примеры записей ЭМГ и амплитуды движений исп. С. И.

Начало ЧЭССМ (СТ) обозначено стрелкой.

Справа — усредненные по всем испытуемым изменения суммарной ЭМГ при ЧЭССМ относительно значений до стимуляции.

* — достоверность ($p < 0,05$) изменения параметров при стимуляции

Fig. 2. Changes in the EMG activity of the muscles of the tibialis anterior (TA) and medial gastrochemius (MG), and the amplitude of the right big toe movements (F) under tSCS during rest state (1), voluntary (2), and passive (3) stepping movements. Left — examples of EMG records and the amplitude of the movements of Subject S. I.

The arrow indicates the beginning of stimulation. Right — average data for all subjects, changes under stimulation in the total EMG, relative to the values before stimulation.

* — reliability ($p < 0.05$) of parameter changes under stimulation

вывески ног (Миняева, Герасименко, Моисеев и др. 2016; Миняева, Моисеев, Пухов и др. 2017).

Во 2-й серии исследования начало стимуляции на фоне совершения испытуемыми активных движений ногами сопровождалось достоверным увеличением минутного объема вентиляции легких на $3,23 \pm 1,06$ л/мин за счет достоверного прироста глубины дыхания на $0,10 \pm 0,03$ л. Прирост потребления кислорода был недостоверным. Дыхательный объем увеличился благодаря достоверному приросту объемных скоростей вдоха и выдоха на фоне некоторого сокращения их продолжительности. При этом

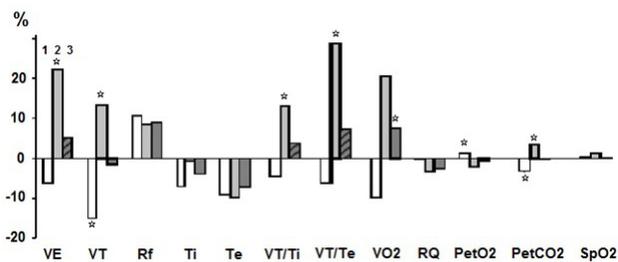


Рис. 3. Изменение параметров вентиляции легких и газообмена при ЧЭССМ на фоне состояния покоя (1), при произвольных (2) и пассивных (3) движениях относительно значений до стимуляции; обозначения параметров как в методике.

Достоверность ($p < 0,05$) изменения параметров: * — относительно значений при отсутствии стимуляции; столбцы с жирной обводкой — относительно значений при состоянии покоя; штриховка — относительно значений при выполнении произвольных движений

Fig. 3. The changes in the parameters of lung ventilation and gas exchange under tSCS during rest state (1), voluntary (2), and passive (3) stepping movements, relative to the values before stimulation.

Reliability ($p < 0.05$) of parameter changes:

* — relative to values in the absence of stimulation, bold bars — relative to values in rest state, hatched bars — relative to values when performing voluntary movements

наблюдалось достоверное увеличение парциального давления углекислого газа во выдыхаемом воздухе на $1,30 \pm 0,29$ мм рт. ст. Однако отмеченные изменения дыхания могли быть как результатом начала ЧЭССМ, так и следствием реализации гуморально-рефлекторной регуляции дыхания в ответ на повышение содержания углекислого газа в крови.

В 3-й серии исследования респираторная реакция на начало ЧЭССМ на фоне пассивных движений была слабо выражена. Однако прослеживалась тенденция к увеличению частоты и снижению глубины дыхания. Было отмечено достоверное повышение потребления кислорода на $33,1 \pm 13,16$ мл/мин.

Сравнение респираторных эффектов ЧЭССМ на уровне T12-L1 позвонков выявило однонаправленные изменения временных параметров дыхательного цикла (рис. 3). Тогда как остальные респираторные параметры демонстрируют разнонаправленные реакции на ЧЭССМ: в состоянии покоя ЧЭССМ снижает скорости вдоха и выдоха и, как следствие, вентиляцию легких; при выполнении активных и пассивных движе-

ний скорости вдоха, выдоха и вентиляция легких растут.

Выявленные различия в респираторных реакциях на ЧЭССМ, скорее всего, связаны с наложением разнонаправленных эффектов стимуляции поясничного утолщения спинного мозга, с одной стороны, и комплекса нейрогенных и гуморально-рефлекторных механизмов регуляции дыхания при физической работе, с другой стороны. В результате при внешнем сдерживании вызванных стимуляцией движений влияние ЧЭССМ, подавляющей выполнение вдоха за счет тонической активации экспираторной мускулатуры, на вентиляцию легких оказывается значительно более мощным, чем нейрогенного (сдерживание конечностей препятствует активации проприоцепторов) и гуморально-рефлекторного (эффект Лингарда при статической работе) механизмов регуляции дыхания.

Напротив, при ЧЭССМ на фоне выполнения произвольных движений более мощными оказываются эффекты нейрогенного и гуморально-рефлекторного механизмов регуляции дыхания, направленные на увеличение вентиляции легких в соответствии с метаболическими потребностями организма. При ЧЭССМ на фоне выполнения пассивных движений эффекты ЧЭССМ и механизмов регуляции дыхания при мышечной деятельности оказываются практически

сбалансированными. Следовательно, можно говорить об участии не прямой активации абдоминальной экспираторной мускулатуры и об активации спинальных центров, связывающих дыхательный и шагательный генераторы (Исаев, Герасименко 2005).

В настоящем исследовании, как и в двух наших предыдущих работах (Миняева, Герасименко, Моисеев и др. 2016; Миняева, Моисеев, Пухов и др. 2017), показано, что стимуляция спинного мозга в нижнегрудном отделе у человека вызывает быструю, в течение первых дыхательных циклов, активацию абдоминальной мускулатуры. Это дает основание полагать, что ЧЭССМ потенциально может применяться для восстановления дыхательной функции у пациентов с заболеваниями респираторной системы.

До недавнего времени реакцию дыхательной системы на электрическую стимуляцию спинного мозга изучали только на животных моделях. Метод ЧЭССМ позволяет проводить исследования с участием людей в качестве испытуемых. Возможная задача следующих исследований — проверить, является ли увеличение частоты дыхания в ответ на стимуляцию следствием прямой активации спинальных нейронных сетей или это изовентиляторная реакция на снижение или недостаточное увеличение глубины дыхания, то есть вторичная реакция на электростимуляцию.

Литература

- Бреслав, И. С., Волков, Н. И., Тамбовцева, Р. В. (2013) *Дыхание и мышечная активность человека в спорте: руководство для изучающих физиологию человека*. М.: Советский спорт, 333 с.
- Гришин, А. А., Мошонкина, Т. Р., Солопова, И. А. и др. (2016) Пятиканальный неинвазивный электростимулятор спинного мозга для реабилитации пациентов с тяжелыми двигательными нарушениями. *Медицинская техника*, № 5 (299), с. 8–11.
- Гришин, А. А., Мошонкина, Т. Р., Боброва, Е. В., Герасименко, Ю. П. (2019) Комплекс для реабилитационного лечения пациентов с двигательной патологией с использованием механотерапии, чрескожной электростимуляции спинного мозга и биологической обратной связи. *Медицинская техника*, № 4 (316), с. 1–4.
- Исаев, Г. Г., Герасименко, Ю. П. (2005) Механизм «быстрого нейрогенного компонента» вентиляторной реакции при инициации двигательной активности. *Физиология человека*, т. 31, № 5, с. 73–79.
- Миняева, А. В., Герасименко, Ю. П., Моисеев, С. А. и др. (2016) Сравнительный анализ реакций системы дыхания на произвольные и вызванные стимуляцией спинного мозга шагательные движения. *Ульяновский медико-биологический журнал*, № S4, с. 47–49.
- Миняева, А. В., Моисеев, С. А., Пухов, А. М. и др. (2017) Реакция внешнего дыхания на движения, вызванные чрескожной стимуляцией спинного мозга. *Физиология человека*, т. 43, № 5, с. 43–51. DOI: 10.7868/S0131164617050113
- Миняева, А. В., Моисеев, С. А., Пухов, А. М. и др. (2019) Зависимость респираторной реакции от интенсивности локомоторного ответа на чрескожную электрическую стимуляцию спинного мозга. *Физиология человека*, т. 45, № 3, с. 38–47. DOI: 10.1134/S0131164619030111
- Nachmann, J. T., Grahn, P. J., Calvert, J. S. et al. (2017) Electrical neuromodulation of the respiratory system after spinal cord injury. *Mayo Clinic Proceedings*, vol. 92, no. 9, pp. 1401–1414 PMID: 28781176. DOI: 10.1016/j.mayocp.2017.04.011

References

- Breslav, I. S., Volkov, N. I., Tambovtseva, R. V. (2013) *Dykhaniye i myshechnaya aktivnost' cheloveka v sporte: rukovodstvo dlya izuchayushchikh fiziologiyu cheloveka [Breathing and muscle activity of a person in sports: Handbook for human physiology learners]*. Moscow: Sovetskij sport Publ., 333 p. (In Russian)
- Grishin, A. A., Moshonkina, T. R., Bobrova, E. V., Gerasimenko, Yu. P. (2019) Kompleks dlya reabilitatsionnogo lecheniya patsientov s dvigatel'noj patologiej s ispol'zovaniem mekhanoterapii, chreskozhoj elektrostimulyatsii spinnogo mozga i biologicheskoj obratnoj svyazi [A device for the rehabilitation therapy of patients with motor pathology using mechanotherapy, transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord, and biological feedback]. *Meditinskaya tekhnika*, vol. 4 (316), pp. 1–4. (In Russian)
- Grishin, A. A., Moshonkina, T. R., Solopova, I. A. et al. (2016) Pyatikanal'nyj neinvazivnyj elektrostimulyator spinnogo mozga dlya reabilitatsii patsientov s tyazhelymi dvigatel'nymi narusheniyami [A five-channel non-invasive electrical stimulator of the spinal cord for rehabilitation of patients with severe motor impairment]. *Meditinskaya tekhnika*, vol. 5 (299), pp. 8–11. (In Russian)
- Hachmann, J. T., Grahn, P. J., Calvert, J. S. et al. (2017) Electrical neuromodulation of the respiratory system after spinal cord injury. *Mayo Clinic Proceedings*, vol. 92, no. 9, pp. 1401–1414. PMID: 28781176. DOI: 10.1016/j.mayocp.2017.04.011 (In English)
- Isaev, G. G., Gerasimenko, Yu. P. (2005) Mekhanizm “bystrogo nejrogennoho komponenta” ventilyatornoj reaksii pri initsiatsii dvigatel'noj aktivnosti [Mechanism of the fast neurogenic component of the ventilatory response to the initiation of locomotor activity]. *Fiziologiya cheloveka*, vol. 31, no. 5, pp. 73–79. (In Russian)
- Minyaeva, A. V., Gerasimenko, Yu. P., Moiseev, S. A. et al. (2016) Sravnitel'nyj analiz reaktsij sistemy dykhaniya na proizvol'nye i vyzvannye stimulyatsiej spinnogo mozga shagatel'nye dvizheniya [Comparative analysis of the reactions of the respiratory system to voluntary and walking movements caused by spinal cord stimulation]. *Ulyanovskij medico-biologicheskij zhurnal — Ulyanovsk Medico-biological Journal*, no. S4, pp. 47–49. (In Russian)
- Minyaeva, A. V., Moiseev, S. A., Pukhov, A. M. et al. (2017) Reaktsiya vneshnego dykhaniya na dvizheniya, vyzvannye chreskozhoj stimulyatsiej spinnogo mozga [Response of external inspiration to the movements induced by transcutaneous spinal cord stimulation]. *Fiziologiya cheloveka*, vol. 43, no. 5, pp. 43–51. DOI: 10.7868/S0131164617050113 (In Russian)
- Minyaeva, A. V., Moiseev, S. A., Pukhov, A. M. et al. (2019) Zavisimost' respiratornoj reaksii ot intensivnosti lokomotornogo otveta na chreskozhojnyu elektricheskuyu stimulyatsiyu spinnogo mozga [Dependence of respiratory reaction on the intensity of locomotor response to transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord]. *Fiziologiya cheloveka*, vol. 45, no. 3, pp. 38–47. DOI: 10.1134/S0131164619030111 (In Russian)