

УДК 616.832-001-053-08-06:615.84
DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS322843>



Научный обзор

Топическая электростимуляция для коррекции дыхательных расстройств при травме спинного мозга (обзор литературы)

В.Г. Тория, С.В. Виссарионов, М.В. Савина, А.Г. Баиндурашвили, П.А. Першина

Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Повреждение спинного мозга может привести к опасной форме паралича дыхательных мышц, что значительно снижает дыхательную способность. Люди с повреждением спинного мозга сталкиваются с повышенным риском развития различных респираторных осложнений. На сегодняшний день существуют эффективные технологии, обеспечивающие положительное воздействие на долгосрочное восстановление дыхательной функции и создающие условия для формирования нейропластичности в поврежденном спинном мозге. Высокая актуальность и отсутствие систематизации данных методик в мировой литературе послужили основой для описания топического подхода в электростимуляции для коррекции дыхательных расстройств у пациентов с травматическим повреждением спинного мозга. **Цель** — сформировать алгоритм топической электростимуляции спинного мозга и дыхательных мышц для коррекции нарушений функции дыхания у пациентов с травмой спинного мозга, основываясь на последних научных литературных данных.

Материалы и методы. В статье представлены результаты поиска и анализа рецензируемых статей, в которых изучали влияние различных методик электростимуляции на дыхательную функцию у пациентов с травмой спинного мозга. Поиск выполнен в ресурсах ScienceDirect, Google Scholar, PubMed за период с 2000 по 2022 г.

Результаты. Сформирован алгоритм электростимуляции спинного мозга и мышц с целью персонализации подхода к лечению пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой в зависимости от уровня и периода травматического повреждения спинного мозга.

Заключение. Методы электростимуляции показали свою эффективность в лечении травм спинного мозга, особенно с целью коррекции дыхательных расстройств. Выбор подходящего метода нейростимуляции зависит от тяжести, уровня повреждения и периода травмы. Неинвазивные методы, такие как функциональная электростимуляция и транскутанная стимуляция спинного мозга, могут быть применены и в остром, и в хроническом периоде, в то время как инвазивные методы, такие как эпидуральная стимуляция и постановка водителя дыхательного ритма, целесообразно использовать в хроническом периоде травмы. Несмотря на положительные результаты этих методов, необходимы дальнейшие исследования для разработки оптимальных планов лечения, повышения их эффективности и получения долгосрочных результатов.

Ключевые слова: травма спинного мозга; механическая вентиляция легких; паралич дыхательных мышц; нейропротезирование; нейропластичность; нейромодуляция; электростимуляция; генератор ритма; реабилитация.

Как цитировать

Тория В.Г., Виссарионов С.В., Савина М.В., Баиндурашвили А.Г., Першина П.А. Топическая электростимуляция для коррекции дыхательных расстройств при травме спинного мозга (обзор литературы) // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2023. Т. 11. № 3. С. 381–391. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS322843>

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS322843>

Review

Topical electrostimulation for correction of respiratory disorders in spinal cord injury: A review

Vakhtang G. Toriya, Sergei V. Vissarionov, Margarita V. Savina, Alexey G. Baidurashvili, Polina A. Pershina

H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: A spinal cord injury can lead to paralysis of the respiratory muscles, resulting in a significant reduction in breathing ability. People with a spinal cord injury face an increased risk of developing various respiratory complications. To date, existing effective technologies positively affect the long-term recovery of respiratory function and create conditions for neuroplasticity in the injured spinal cord. The high relevance and lack of systematization of these techniques in the world literature served as the basis for describing a topical approach in electrostimulation for the correction of respiratory disorders in patients with traumatic spinal cord injuries.

AIM: To formulate an algorithm for topical electrostimulation of the spinal cord and respiratory muscles to correct respiratory dysfunction in patients with spinal cord injury based on the latest scientific literature.

MATERIALS AND METHODS: This article presents the results of the analysis of peer-reviewed articles that investigated the effects of various electrostimulation techniques on respiratory function in patients with spinal cord injury. Searches were performed on ScienceDirect, Google Scholar, and PubMed for the period from 2000 to 2022.

RESULTS: A spinal cord and muscle electrostimulation algorithm was formulated to personalize the treatment approach for patients with spinal cord injury depending on the level and period of traumatic spinal cord injury.

CONCLUSIONS: Electrostimulation techniques were found to be effective in the treatment of spinal cord injuries, particularly for the correction of respiratory disorders. The choice of the appropriate neurostimulation technique depends on the severity, injury level, and period of injury. Noninvasive techniques, such as FES and TSSM, can be used from the acute period to the chronic period, whereas invasive techniques, such as epidural stimulation and respiratory pacemaker placement, are appropriate in the chronic period. Despite the positive results of these techniques, further research is needed to develop effective treatment plans and improve their effectiveness and long-term outcomes.

Keywords: spinal cord injury; mechanical ventilation; respiratory muscle palsy; neuroprosthesis; neuroplasticity; neuromodulation; electrical stimulation; rhythm generator; rehabilitation.

To cite this article

Toriya VG, Vissarionov SV, Savina MV, Baidurashvili AG, Pershina PA. Topical electrostimulation for correction of respiratory disorders in spinal cord injury: A review. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2023;11(3):381–391. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS322843>

Received: 13.04.2023

Accepted: 27.07.2023

Published: 29.09.2023

ОБОСНОВАНИЕ

Повреждение спинного мозга, в особенности шейного отдела, может привести к опасной форме паралича дыхательных мышц, что значительно снижает дыхательную способность. По оценкам, почти 40 % людей, получивших травму этого сегмента спинного мозга, нуждаются в механической вентиляции для поддержания функции дыхания [1]. Более того, по предварительным данным, около 5 % пациентов, которым требуется механическая вентиляция в остром периоде травматического повреждения, будут нуждаться в ней в дальнейшем на постоянной основе [1].

Люди с повреждением спинного мозга сталкиваются с повышенным риском возникновения дыхательной дисфункции и связанных с ней осложнений, включая пневмонию, ателектаз и потенциально опасную для жизни дыхательную недостаточность [2, 3].

Респираторный дистресс — основной фактор развития вторичных соматических, инфекционных заболеваний и летального исхода после травматических повреждений шейного отдела спинного мозга. Это состояние представляет серьезную проблему как для пациентов, так и для специалистов здравоохранения, поскольку ассоциировано с существенным риском для общего здоровья и благополучия человека [4].

Полная зависимость от механической вентиляции часто приводит к тому, что пациент не может проживать в своем доме, поэтому обязанности по уходу берут на себя учреждения долгосрочного ухода. Внимательный уход за пациентом, находящимся на вентиляции легких, предполагает круглосуточное наблюдение со стороны квалифицированного персонала. Ухаживающий должен обладать опытом, чтобы регулировать настройки аппарата искусственной вентиляции легких для обеспечения оптимальной функции дыхания и адаптации к изменениям в насыщении кислородом. Кроме того, крайне важен правильный дренаж легких, включая перкуссию грудной клетки с целью регулярной санации и формирования кашлевого рефлекса [5].

Механическая вентиляция не только препятствует мобильности и независимости пациента, страдающего от нарушения двигательной функции конечностей вследствие травмы, но и вызывает физический дискомфорт, нарушения речи и обоняния различной степени [6].

Учитывая эти факты, восстановление независимости от механической вентиляции легких имеет огромное значение как с точки зрения медицинского и психологического состояния, так и социально-экономического и бытового благополучия. Это минимизирует риск развития респираторных осложнений, повышает мобильность пациентов и освобождает их от постоянной зависимости от медицинского ухода.

На сегодняшний день существуют различные эффективные технологии, способные положительно воздействовать на долгосрочное восстановление дыхательной функции и создавать условия для формирования нейро-

пластичности в поврежденном спинном мозге [7]. Высокая актуальность и отсутствие систематизации данных методик в мировой литературе послужили основой для описания топического подхода в электростимуляции с целью коррекции дыхательных расстройств у пациентов с травматическим повреждением спинного мозга.

Цель — сформировать алгоритм топической электростимуляции дыхательных мышц для коррекции нарушенной функции дыхания у пациентов с травмой спинного мозга, основываясь на последних научных литературных данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Представлены результаты поиска и анализа рецензируемых статей, в которых изучали влияние различных методик электростимуляции на дыхательную функцию у пациентов с травмой спинного мозга.

Поиск проводили в базах данных ScienceDirect, Google Scholar и PubMed за период с 2000 по 2022 г. Были использованы следующие ключевые слова: respiratory center, breathing regulation, rhythmogenesis, ventilatory control, respiratory drive, inspiratory neurons, expiratory neurons, spinal cord injury, electrostimulation diaphragm pacing, transcutaneous spinal cord stimulation, epidural spinal cord stimulation, functional electrical stimulation, neuromodulation, neuroprosthesis, stimulation, electrical stimulation, muscle stimulation, respiration, cough.

В анализ включали статьи, содержащие последние данные о влиянии различных методик электростимуляции на дыхательную функцию у пациентов с травмой спинного мозга. Исключали дублирующие статьи (или статьи, в которых участники исследования не были независимы от предыдущей публикации) и редакционные работы. В ходе первоначального поиска было найдено 450 статей. После удаления дубликатов и анализа заголовков и аннотаций оставшиеся 380 статей проверяли на заранее определенные критерии включения. В результате осталось 78 статей для полнотекстовой оценки. Критериям включения удовлетворяли статьи, в которых исследовали влияние методик электростимуляции на дыхательную функцию пациентов с травмой спинного мозга.

При полнотекстовом обзоре анализировали методологию, актуальность и информативность каждой статьи. После такой проверки были отобраны наиболее актуальные и качественные статьи, подходящие для данного исследования, — 31 рецензируемая статья.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анатомия и физиология

Дыхательные мышцы можно разделить на две категории: инспираторные и экспираторные. Инспираторные мышцы, также известные как мышцы вдоха, служат для расширения грудной полости и последующего

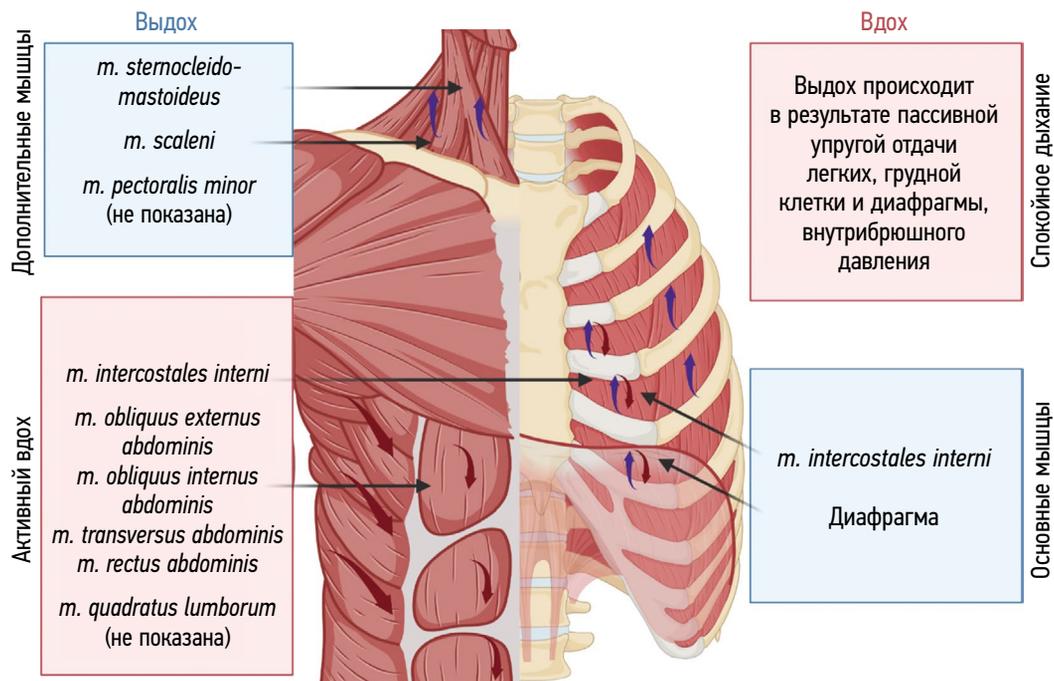


Рис. 1. Анатомия основных и вспомогательных дыхательных мышц

набора воздуха в легкие. Для этого они поднимают ребра и грудину. Экспираторные мышцы способствуют сокращению грудной полости, играют роль в выдыхании воздуха из легких, опуская ребра и грудину. Эти группы мышц работают согласованно, чтобы облегчить жизненно важный процесс дыхания и обеспечить правильный обмен кислорода и углекислого газа в организме. Чтобы дыхание происходило плавно и эффективно, необходимо поддерживать баланс между инспираторными и экспираторными мышцами (рис. 1).

Основные инспираторные мышцы — это диафрагма и наружные межреберные мышцы. Моторную

иннервацию диафрагмы осуществляет диафрагмальный нерв, а чувствительную иннервацию обеспечивают диафрагмальный нерв (сухожильный центр диафрагмы) и шестая или седьмая пара межреберных нервов (периферические части диафрагмы). Все межреберные мышцы иннервируются соответствующими им межреберными нервами.

Вспомогательные мышцы вдоха — это грудино-ключично-сосцевидная мышца, передняя, средняя и задняя лестничные мышцы, большая и малая грудные мышцы, нижние волокна передней зубчатой мышцы и широчайшая мышца спины. Задняя верхняя зубчатая мышца (как и шейная часть подвздошно-реберной мышцы шеи) может участвовать во вдохе.

В покое выдох — это пассивный процесс, происходящий вследствие эластичности грудной клетки и легочной ткани, а также постоянного внутрибрюшного давления. К основным экспираторным мышцам, формирующим активный выдох, относят внутренние межреберные мышцы, самые внутренние межреберные мышцы, подреберные мышцы и мышцы передней брюшной стенки: прямую мышцу живота, наружную косую мышцу, внутреннюю косую мышцу и поперечную мышцу живота. Иннервацию мышц передней брюшной стенки осуществляют в основном межреберные нервы (Th₆–Th₁₂).

К вспомогательным экспираторным мышцам относят заднюю нижнюю зубчатую мышцу, квадратную мышцу поясницы, самые нижние волокна подвздошно-реберной мышцы и длиннейшую мышцу в области грудопоясничного перехода [8].

В хроническом периоде травмы спинного мозга происходит компенсаторное включение в акт дыхания вспомогательных мышц — верхней части трапециевидной

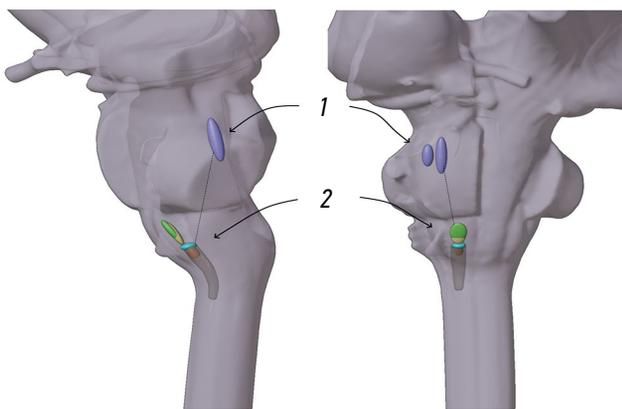


Рис. 2. Локализация связанных с формированием ритма дыхания областей в стволе мозга. 1 — понтинные дыхательные области: ядро Колликера – Фьюза и парабрахиаальный комплекс; 2 — медуллярные дыхательные центры, сверху вниз: парафациальная дыхательная группа (зеленый цвет), ретро-трапециевидное ядро (желтый цвет), комплекс пре-Ботцингера (бирюзовый цвет), комплекс Ботцингера (красный цвет). Верхние шейные инспираторные нейроны (черный цвет). Вид в сагиттальной и фронтальной проекциях



Рис. 3. Схема rostro-caudальной структуры генерации дыхательного ритма, включая стволовые и спинальные дыхательные сети, которые организуют rostro-caudальный градиент инспираторной моторной активности

мышцы во время вдоха, больших грудных мышц и широчайшей мышцы спины во время выдоха [9].

Для формирования взгляда и парадигмы топической стимуляции с целью коррекции респираторных расстройств необходимо понимание современных представлений о центральном механизме генерации дыхательного ритма.

Последние данные свидетельствуют о наличии двух основных генераторов дыхательного ритма: парафациальной дыхательной группы (pFRG) и комплекса пре-Ботцингера (preBotC, инспираторная популяция пейсмейкеров). Инспираторная и экспираторная активность, осуществляемая в этих медуллярных генераторах дыхательных ритмов, модулируется из различных участков нижней части ствола мозга, включая мост и комплекс Ботцингера, и затем выводится в виде активности мотонейронов через эфферентные сети в стволе мозга и спинном мозге (рис. 2) [10, 11].

Дыхание включает сложную схему движений, для которой многочисленные мотонейроны, расположенные вдоль спинного мозга, должны срабатывать в правильной пространственной и временной последовательности. Ряд исследований показал, что наружные межреберные мышцы и их нервы активны во время вдоха и инспираторная активность в ростральных межреберных промежутках сильнее, чем в каудальных [12]. Соответственно, парастеральная область каждой из внутренних межреберных мышц активна во время фазы вдоха, мышцы в ростральных межреберных промежутках проявляют более сильную активность, чем мышцы в каудальных межреберных промежутках [13, 14]. Rostro-caudальная структура генерации дыхательного ритма, разделенная условно на уровни в соответствии с возможностью применения методик стимуляции, представлена на рис. 3.

В последние годы значительное внимание уделяется использованию электростимуляции для лечения

дыхательной недостаточности. Этот подход улучшает дыхательную функцию и снижает необходимость в механической вентиляции у пациентов с травмой спинного мозга [7].

Тактика сегментарного применения электростимуляции

При травме сегмента C₂ и выше нарушается эфферентная ритмогенная иннервация дыхания до уровня двигательных мотонейронов *n. phrenicus*, формируется парез диафрагмы, межреберных мышц и основных экспираторных мышц. Субстратом для восстановления могут служить интернейроны группы верхних шейных инспираторных нейронов. Верхние шейные инспираторные нейроны не являются областью основной генерации дыхательных ритмов, но участвуют в формировании инспираторных дыхательных паттернов, а в случае повреждения задействуют вспомогательные пути для восстановления и реорганизации цепи и даже могут выступать в качестве резервного генератора дыхательных ритмов. Таким образом, дыхательные нейронные цепи высокого шейного отдела спинного мозга — жизненно важный компонент дыхательной сети [15].

При поражении на данном уровне у пациентов формируются расстройства инспираторной и экспираторной функций.

Неинвазивные методики коррекции дыхательных расстройств применяют в остром и хроническом периодах травмы спинного мозга. В нашей клинической практике мы начинали применение функциональной электростимуляции (ФЭС) и транскутанной стимуляции спинного мозга (ТССМ) в раннем периоде, с 5-х суток после хирургического вмешательства. Вопрос сроков использования стимуляционных методик до сих пор обсуждается, большинство исследователей неинвазивной электростимуляции

описывают клиническую эффективность в хроническом периоде, представлены незначительные данные об эффективности применения и в остром периоде [16].

Для стимуляции инспираторной функции возможно применение транскутанной стимуляции спинного мозга [17, 18]. Стимуляцию следует проводить выше и ниже уровня травмированного сегмента, параметры стимуляции электрическим током подбирают индивидуально в присутствии врача-реаниматолога. Минимальный возраст пациентов детского возраста, которым применяли данную методику, составил 3 года [19]. В нашей клинической практике минимальный возраст пациента, которому проводили транскутанную стимуляцию, составил 6 лет.

Для стимуляции экспираторной функции и формирования кашлевого рефлекса эффективна абдоминальная ФЭС. Методика представляет собой стимуляцию косых и прямых мышц живота электрическим током. Средние значения стимуляции: сила тока — 90–100 мА, длительность импульса — 200–300 мкс, частота стимуляции — 30–50 Гц [16]. По литературным данным, минимальный возраст использования данной методики у пациентов детского возраста — 3 года [20].

Тактика применения неинвазивных методик ТССМ и ФЭС в остром и хроническом периодах аналогична тактике при коррекции дыхательных расстройств на всех уровнях травмы спинного мозга.

В хроническом периоде травмы спинного мозга при потребности в долгосрочной механической вентиляции показана постановка водителя дыхательного ритма. Различные производители регламентируют возраст применения самостоятельно, единого стандарта на сегодняшний день нет. К примеру, симулятор диафрагмального нерва производителя Avery одобрен FDA (Food and Drug Administration, USA) для имплантации в любом возрасте [21].

Для имплантации необходимы сохраненный диафрагмальный нерв, отсутствие легочной патологии, сохранность сознания. Для объективного подтверждения проводимости диафрагмального нерва стимулируют каждый

нерв с источником, расположенным над выемкой грудины на медиальной поверхности грудино-ключично-сосцевидной мышцы, и оценивают вызванную активность диафрагмы. Регистрирующий электрод располагается на уровне переднекостального края девятого межреберного промежутка (рис. 4).

Устройство обычно состоит из внешнего передатчика и одного или нескольких имплантируемых приемников, которые подключают к электродам, стимулирующим диафрагмальные нервы. Процедуру имплантации можно производить на уровне шеи или интраторакально непосредственно на диафрагмальные нервы. Альтернативно можно использовать лапароскопическую постановку на брюшную поверхность диафрагмы, для определения оптимального места размещения электродов проводят точечную электростимуляцию и устанавливают основную двигательную точку диафрагмы [22, 23].

Травма на уровне сегментов C_3 – C_5 морфологически характеризуется поражением моторных ядер *n. phrenicus*, нарушением эфферентной дыхательной ритмогенной иннервации до нижерасположенных уровней. Формируется вялый парез диафрагмы с атрофией диафрагмальных нервов, парез межреберных мышц и основных экспираторных мышц. Субстратом для восстановления могут служить интернейроны группы верхних шейных инспираторных нейронов. При поражении на данном уровне у пациентов развиваются расстройства инспираторной и экспираторной функций.

В хроническом периоде травмы спинного мозга при возникновении паралича диафрагмы, необходимости продолженной механической вентиляции постановка водителя диафрагмального ритма не всегда возможна. Если двигательные ядра *n. phrenicus* поражены частично и подтверждена проводимость по диафрагмальным нервам, то установить водителя дыхательного ритма возможно. Однако в случае атрофии диафрагмальных нервов, нарушении проводимости, подтвержденной нейрофизиологическими исследованиями, установка водителя может не дать ожидаемого эффекта. В этих случаях возможна имплантация эпидурального электрода для нейромодуляции и стимуляции нейропластичности. По литературным данным, минимальный возраст применения данной методики у пациентов детского возраста — 8 лет [24].

Инспираторные межреберные мышцы активируют при эпидуральной имплантации электрода на вентральной поверхности на уровне Th_2 [25].

Клинические исследования на пациентах с тетраплегией, находящихся на искусственной вентиляции легких, показали, что активация одних только межреберных мышц приводила к увеличению объема вдыхаемого воздуха [26]. Стимуляцию проводят в высокочастотном режиме 300 Гц (High Frequency Spinal Cord Stimulation), она может вызвать физиологический паттерн активации инспираторной мускулатуры [25].

Даже в случаях клинически полного повреждения спинного мозга нейромодуляция ниже уровня поврежде-

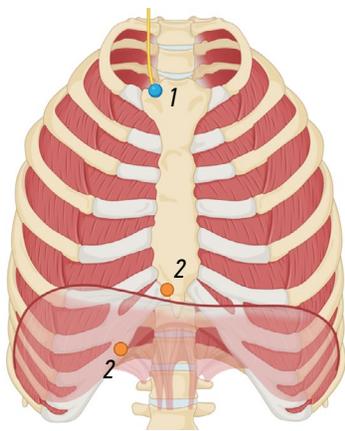


Рис. 4. Исследование проводимости диафрагмального нерва. Схема положения стимулирующего электрода (1) и регистрирующих электродов (2)

ния способна восстановить вегетативные и волевые сомоторные функции [27–29].

Травма на уровне сегментов C₆–Th₁ характеризуется нарушением эфферентной дыхательной ритмогенной иннервации ниже уровня ядер *n. phrenicus*, сохранением контроля диафрагмального дыхания, формированием паралича межреберных и основных экспираторных мышц. Это приводит к неполным нарушениям инспираторной и полным расстройствам экспираторной функций [25].

В хроническом периоде травмы спинного мозга для коррекции дыхательных расстройств возможна имплантация эпидурального электрода на уровне Th₂ для нейромодуляции и стимуляции нейропластичности.

Травма на уровне Th₁–Th₃. По данным исследований, многие грудные интернейроны обладают дыхательной активностью [30]. При этом инспираторных интернейронов больше в более ростральных грудных сегментах, тогда как инспираторных возбуждающих постсинаптических потенциалов больше в интернейронах, расположенных в более ростральных сегментах, в основном в сегментах Th₁–Th₃ [31].

Травма на данном уровне морфологически характеризуется поражением интернейронов, участвующих в формировании росто-каудального градиента инспираторной моторной активности и расположенных в более ростральных сегментах спинного мозга, это приводит к парезу межреберных и экспираторных мышц, контроль диафрагмального дыхания сохраняется.

В хроническом периоде травмы спинного мозга имплантация эпидурального электрода на уровне сегмента Th₂ для коррекции дыхательных расстройств, как описано при травме более высоких уровней, может не принести ожидаемого эффекта, с целью нейромодуляции и стимуляции нейропластичности на данном уровне возможна имплантация эпидуральных электродов на уровне смежных сегментов, выше и ниже уровня травмы.

Травма на уровне Th₃–Th₉ характеризуется повреждением преинтернейронов и интернейронов, участвующих в формировании росто-каудального градиента инспираторной двигательной активности в грудном отделе спинного мозга. Однако основной центр формирования росто-каудального градиента инспираторной моторной активности Th₁–Th₃ остается интактен. Это приводит к неполному расстройству инспираторной функции и неполному парезу межреберных и полному экспираторных мышц.

Центр иннервации экспираторной активности в Th₉ неповрежден, и двигательные нейроны основных экспираторных мышц также сохранены.

В хронической фазе повреждения спинного мозга для улучшения экспираторной и инспираторной функций дыхания может быть использована имплантация эпидурального электрода на уровне Th₉, Th₁₁ и L₁ для нейромодуляции и стимуляции нейропластичности. Однако для оптимизации терапевтического эффекта может потребоваться имплантация эпидуральных электродов в соседние сегменты выше и ниже повреждения [32].

Травма на уровне Th₉. Основной экспираторный центр в спинном мозге расположен в нижних грудных сегментах с наибольшей активностью на уровне сегмента Th₉. Этот центр отвечает за иннервацию экспираторных мышц, включая брюшные и внутренние межреберные мышцы. Экспираторный центр организован сегментарно, причем разные уровни отвечают за разные аспекты контроля выдоха. Уровни Th₇–Th₈ в основном ответственны за активацию экспираторных мышц, расположенных рострально, а уровни Th₁₀–Th₁₂ — за активацию экспираторных мышц, расположенных более каудально [33]. Травма на данном уровне приводит к повреждению моторных нейронов основных экспираторных мышц, формированию вялого пареза, отсутствию активного выдоха и кашля, в результате чего пассивная экспирация становится доминирующим механизмом. Это приводит к дисбалансу в активности дыхательных мышц и снижению эффективности дыхания. У данной группы пациентов возможна атрофия экспираторных мышц, поэтому электростимуляция может быть мало- или неэффективна.

Разработка алгоритма персонифицированной электростимуляции спинного мозга и мышц является перспективным подходом к лечению дыхательной недостаточности (рис. 5).

Представленный алгоритм электростимуляции спинного мозга и мышц разработан с целью персонализации подхода к лечению пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой в зависимости от уровня и периода травматического повреждения спинного мозга. Алгоритм построен на анализе литературных данных, приведенных в статье. Он синтезирует и упорядочивает знания для обеспечения персонализированного подхода к лечению пациентов с травмой спинного мозга.

В остром периоде травмы используют неинвазивные методы лечения, такие как ТССМ и ФЭС мышц передней брюшной стенки. ТССМ — это неинвазивный метод, который предполагает воздействие электрического тока через кожу на спинной мозг, что может улучшить дыхательную функцию за счет модуляции возбудимости дыхательных нейронов. Функциональная электростимуляция мышц передней брюшной стенки также неинвазивный метод, при котором электрическая стимуляция активирует мышцы живота, что может способствовать формированию кашлевого рефлекса.

В хроническом периоде травмы спинного мозга алгоритм включает сочетание неинвазивных и инвазивных методов лечения. Инвазивные методы, такие как постановка водителя дыхательного ритма (пейсмекер) и эпидуральная стимуляция спинного мозга, добавляются в план лечения с целью дальнейшего улучшения дыхательной функции.

Постановка диафрагмального пейсмекера — это минимально инвазивный метод, который предполагает установку электродов на диафрагмальный нерв или двигательную точку диафрагмы для последующей стимуляции мышцы, что может улучшить дыхательную функцию [1].

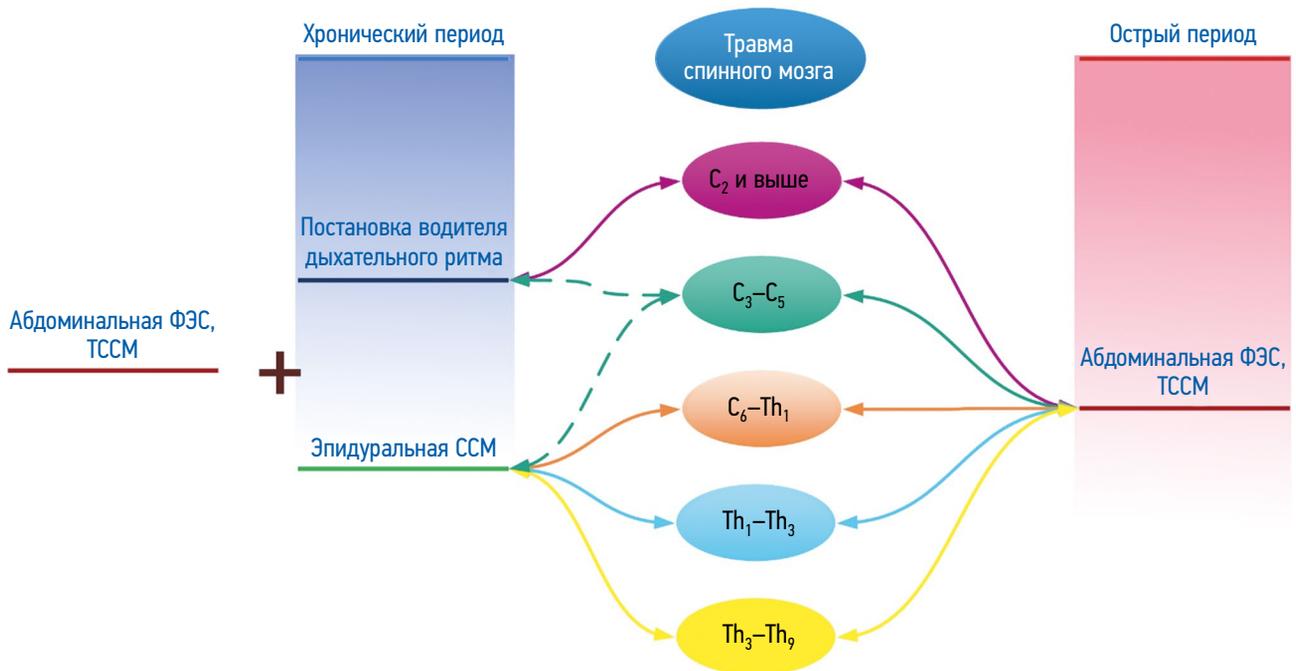


Рис. 5. Алгоритм применения методик электростимуляции для коррекции и ускоренного восстановления дыхательных расстройств при травме спинного мозга. ФЭС — функциональная электростимуляция; ТССМ — транскутанная стимуляция спинного мозга; ССМ — стимуляция спинного мозга

Эпидуральная стимуляция спинного мозга предполагает установку электродов в эпидуральном пространстве спинного мозга для модуляции возбудимости дыхательных нейронов [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы электростимуляции показали свою эффективность в лечении травм спинного мозга, особенно с целью коррекции дыхательных расстройств. Персонализированный подход представляет собой прогрессивный шаг в лечении дыхательной недостаточности у пациентов с травмой спинного мозга и обладает потенциалом для улучшения исходов в этой популяции пациентов.

Выбор подходящего метода нейростимуляции зависит от тяжести, уровня повреждения и периода травмы. Неинвазивные методы, такие как ФЭС и ТССМ, могут быть применены и в остром, и в хроническом периоде, в то время как инвазивные методы, такие как эпидуральная стимуляция и постановка водителя дыхатель-

ного ритма, целесообразно использовать в хроническом периоде травмы. Несмотря на положительные результаты этих методов, необходимы дальнейшие исследования для разработки оптимальных планов лечения, повышения их эффективности и получения долгосрочных результатов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Отсутствует.

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

Вклад авторов. В.Г. Тория — написание всех разделов статьи, сбор и анализ данных, анализ литературы, создание иллюстраций; С.В. Виссарионов — этапное и финальное редактирование текста статьи; М.В. Савина, А.Г. Баидурашвили, П.А. Першина — анализ литературы, этапное редактирование текста статьи, создание иллюстраций.

Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dimarco A.F. Neural prostheses in the respiratory system // *J. Rehabil. Res. Dev.* 2001. Vol. 38. No. 6. P. 601–607.
2. Sezer N., Akkuş S., Uğurlu F.G. Chronic complications of spinal cord injury // *World J. Orthop.* 2015. Vol. 6. No. 1. P. 24–33. DOI: 10.5312/wjo.v6.i1.24
3. Tester N.J., Fuller D.D., Fromm J.S., et al. Long-term facilitation of ventilation in humans with chronic spinal cord injury // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2014. Vol. 189. No. 1. P. 57–65. DOI: 10.1164/rccm.201305-0848oc
4. Berly M., Shem K. Respiratory management during the first five days after spinal cord injury // *J. Spinal Cord. Medicine.* 2007. Vol. 30. No. 4. P. 309–318. DOI: 10.1080/10790268.2007.11753946
5. Jarosz R., Littlepage M.M., Creasey G., et al. Functional electrical stimulation in spinal cord injury respiratory care // *Top. Spinal Cord Inj. Rehabil.* 2012. Vol. 18. No. 4. P. 315–321. DOI: 10.1310/sci1804-315

6. Adler D., Gonzalez-Bermejo J., Duguet A., et al. Diaphragm pacing restores olfaction in tetraplegia // *Eur. Respir. J.* 2008. Vol. 34. No. 2. P. 365–370. DOI: 10.1183/09031936.00177708
7. Hachmann J.T., Grahn P.J., Calvert J.S., et al. Electrical neuromodulation of the respiratory system after spinal cord injury // *Mayo Clin. Proceed.* 2017. Vol. 92. No. 9. P. 1401–1414. DOI: 10.1016/j.mayocp.2017.04.011
8. Gray's anatomy 41st edition: the anatomical basis of clinical practice / ed. by S. Standring. Elsevier Science, 2015.
9. Terson de Paleville D., Lorenz D. Compensatory muscle activation during forced respiratory tasks in individuals with chronic spinal cord injury // *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2015. Vol. 217. P. 54–62. DOI: 10.1016/j.resp.2015.07.001
10. Smith J.C., Abdala A.P., Koizumi H., et al. Spatial and functional architecture of the mammalian brain stem respiratory network: a hierarchy of three oscillatory mechanisms // *J. Neurophysiol.* 2007. Vol. 98. No. 6. P. 3370–3387. DOI: 10.1152/jn.00985.2007
11. Paton J.F.R., Abdala A.P., Koizumi H., et al. Respiratory rhythm generation during gasping depends on persistent sodium current // *Nat. Neurosci.* 2006. Vol. 9. No. 3. P. 311–313. DOI: 10.1038/nn1650
12. De Troyer A., Kirkwood P.A., Wilson T.A. Respiratory action of the intercostal muscles // *Physiol. Rev.* 2005. Vol. 85. No. 2. P. 717–756. DOI: 10.1152/physrev.00007.2004
13. De Troyer A., Gorman R.B., Gandevia S.C. Distribution of inspiratory drive to the external intercostal muscle in humans // *J. Physiol.* 2003. Vol. 546. No. 3. P. 943–954. DOI: 10.1113/jphysiol.2002.028696
14. Gandevia S.C., Hudson A.L., Gorman R.B., et al. Spatial distribution of inspiratory drive to the parasternal intercostal muscles in humans // *J. Physiol.* 2006. Vol. 573. No. 1. P. 263–275. DOI: 10.1113/jphysiol.2005.101915
15. Zaki Ghali M.G., Britz G., Lee K.Z. Pre-phrenic interneurons: Characterization and role in phrenic pattern formation and respiratory recovery following spinal cord injury // *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2019. Vol. 265. P. 24–31. DOI: 10.1016/j.resp.2018.09.005
16. McCaughey E.J., Borotkanics R.J., Gollie H., et al. Abdominal functional electrical stimulation to improve respiratory function after spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis // *Spinal Cord.* 2016. Vol. 54. No. 9. P. 628–639. DOI: 10.1038/sc.2016.31
17. Gad P., Kreydin E., Zhong H., et al. Enabling respiratory control after severe chronic tetraplegia: an exploratory case study // *J. Neurophysiol.* 2020. Vol. 124. No. 3. P. 774–780. DOI: 10.1152/jn.00320.2020
18. Minyaeva A.V., Moiseev S.A., Pukhov A.M., et al. Response of external inspiration to the movements induced by transcutaneous spinal cord stimulation // *Hum. Physiol.* 2017. Vol. 43. No. 5. P. 524–531. DOI: 10.1134/s0362119717050115
19. Keller A., Singh G., Sommerfeld J.H., et al. Noninvasive spinal stimulation safely enables upright posture in children with spinal cord injury // *Nat. Commun.* 2021. Vol. 12. No. 1. DOI: 10.1038/s41467-021-26026-z
20. Joffe J.R. The effect of functional electrical stimulation on abdominal muscle strength and gross motor function in children with cerebral palsy a randomised control trial: dissertation. Cape Town: University of Cape Town; 2014.
21. Averybiomedical.com [Internet] Avery Biomedical devices – leader in diaphragm pacemakers [дата обращения 20.12.2022]. Доступ по ссылке: <http://www.averybiomedical.com>
22. Dalal K., DiMarco A.F. Diaphragmatic pacing in spinal cord injury // *Physical. Med. Rehabil. Clin. N. Am.* 2014. Vol. 25. No. 3. P. 619–629. DOI: 10.1016/j.pmr.2014.04.004
23. Postuszny J.A. Jr., Onders R., Kerwin A.J., et al. Multicenter review of diaphragm pacing in spinal cord injury: successful not only in weaning from ventilators but also in bridging to independent respiration // *J. Trauma Acute Care Surg.* 2014. Vol. 76. No. 2. P. 303–309. DOI: 10.1097/ta.000000000000112
24. Bakr S.M., Knight J., Johnson S.K., et al. Spinal cord stimulation improves functional outcomes in children with complex regional pain syndrome: case presentation and review of the literature // *Pain Practice.* 2020. Vol. 20. No. 6. P. 647–655. DOI: 10.1111/papr.12882
25. DiMarco A.F., Kowalski K.E. Intercostal muscle pacing with high frequency spinal cord stimulation in dogs // *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2010. Vol. 171. No. 3. P. 218–224. DOI: 10.1016/j.resp.2010.03.017
26. Adachi T., Yokoyama M., Onuki T. Experimental evaluation of the optimal tidal volume for simultaneous pacing of the diaphragm and respiratory muscles // *J. Artif. Organs.* 2004. Vol. 7. No. 1. P. 27–29. DOI: 10.1007/s10047-003-0246-4
27. Tator C.H., Minassian K., Mushahwar V.K. Spinal cord stimulation: therapeutic benefits and movement generation after spinal cord injury // *Handbook Clin. Neurol.* 2012. Vol. 109. P. 283–296. DOI: 10.1016/B978-0-444-52137-8.00018-8
28. Angeli C.A., Edgerton V.R., Gerasimenko Y.P., et al. Altering spinal cord excitability enables voluntary movements after chronic complete paralysis in humans // *Brain.* 2014. Vol. 137. No. 5. DOI: 10.1093/brain/awu038
29. Harkema S., Gerasimenko Y., Hodes J., et al. Effect of epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: a case study // *Lancet.* 2011. Vol. 377. No. 9781. P. 1938–1947. DOI: 10.1016/s0140-6736(11)60547-3
30. Saywell S.A., Ford T.W., Meehan C.F., et al. Electrophysiological and morphological characterization of propriospinal interneurons in the thoracic spinal cord // *J. Neurophysiol.* 2011. Vol. 105. No. 2. P. 806–826. DOI: 10.1152/jn.00738.2010
31. Iizuka M., Onimaru H., Izumizaki M. Distribution of respiration-related neuronal activity in the thoracic spinal cord of the neonatal rat: an optical imaging study // *Neuroscience.* 2016. Vol. 315. P. 217–227. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2015.12.015
32. DiMarco A.F., Kowalski K.E. Activation of inspiratory muscles via spinal cord stimulation // *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2013. Vol. 189. No. 2. P. 438–449. DOI: 10.1016/j.resp.2013.06.001
33. DiMarco A.F., Kowalski K.E. Activation of the expiratory muscles via lower thoracic high frequency spinal cord stimulation in awake animals // *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2020. Vol. 276. DOI: 10.1016/j.resp.2019.103360
34. Тория В.Г., Виссарионов С.В., Кубанов Р.Р., и др. Персонализированное применение методик электростимуляции для коррекции и ускоренного восстановления дыхательных расстройств при травме спинного мозга: Свидетельство о регистрации базы данных № 2023621031 RU, 2023.

REFERENCES

1. DiMarco A.F. Neural prostheses in the respiratory system. *J Rehabil Res Dev.* 2001;38(6):601–607.
2. Sezer N, Akkuş S, Uğurlu FG. Chronic complications of spinal cord injury. *World J Orthop.* 2015;6(1):24–33. DOI: 10.5312/wjo.v6.i1.24
3. Tester NJ, Fuller DD, Fromm JS, et al. Long-term facilitation of ventilation in humans with chronic spinal cord injury. *Am J Respir Crit Care Med.* 2014;189(1):57–65. DOI: 10.1164/rccm.201305-0848oc

4. Berlly M, Shem K. Respiratory management during the first five days after spinal cord injury. *J Spinal Cord Med.* 2007;30(4):309–318. DOI: 10.1080/10790268.2007.11753946
5. Jarosz R, Littlepage MM, Creasey G, et al. Functional electrical stimulation in spinal cord injury respiratory care. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.* 2012;18(4):315–321. DOI: 10.1310/sci1804-315
6. Adler D, Gonzalez-Bermejo J, Duguet A, et al. Diaphragm pacing restores olfaction in tetraplegia. *Eur Respir J.* 2008;34(2):365–370. DOI: 10.1183/09031936.00177708
7. Hachmann JT, Grahn PJ, Calvert JS, et al. Electrical neuromodulation of the respiratory system after spinal cord injury. *Mayo Clin Proc.* 2017;92(9):1401–1414. DOI: 10.1016/j.mayocp.2017.04.011
8. Gray's anatomy 41st edition: the anatomical basis of clinical practice. Ed. by S. Standring. Elsevier Science; 2015.
9. Terson de Paleville D, Lorenz D. Compensatory muscle activation during forced respiratory tasks in individuals with chronic spinal cord injury. *Respir Physiol Neurobiol.* 2015;217:54–62. DOI: 10.1016/j.resp.2015.07.001
10. Smith JC, Abdala AP, Koizumi H, et al. Spatial and functional architecture of the mammalian brain stem respiratory network: a hierarchy of three oscillatory mechanisms. *J Neurophysiol.* 2007;98(6):3370–3387. DOI: 10.1152/jn.00985.2007
11. Paton JF, Abdala AP, Koizumi H, et al. Respiratory rhythm generation during gasping depends on persistent sodium current. *Nat Neurosci.* 2006;9(3):311–333. DOI: 10.1038/nn1650
12. De Troyer A, Kirkwood PA, Wilson TA. Respiratory action of the intercostal muscles. *Physiol Rev.* 2005;85(2):717–756. DOI: 10.1152/physrev.00007.2004
13. De Troyer A, Gorman RB, Gandevia SC. Distribution of inspiratory drive to the external intercostal muscles in humans. *J Physiol.* 2003;546:943–954. DOI: 10.1113/jphysiol.2002.028696
14. Gandevia SC, Hudson AL, Gorman RB, et al. Spatial distribution of inspiratory drive to the parasternal intercostal muscles in humans. *J Physiol.* 2006;573:263–275. DOI: 10.1113/jphysiol.2005.101915
15. Zaki Ghali MG, Britz G, Lee KZ. Pre-phrenic interneurons: Characterization and role in phrenic pattern formation and respiratory recovery following spinal cord injury. *Respir Physiol Neurobiol.* 2019;265:24–31. DOI: 10.1016/j.resp.2018.09.005
16. Caughey EJ, Borotkanics RJ, Gollee H, et al. Abdominal functional electrical stimulation to improve respiratory function after spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis. *Spinal Cord.* 2016;54(9):628–639. DOI: 10.1038/sc.2016.31
17. Gad P, Kreydin E, Zhong H, et al. Enabling respiratory control after severe chronic tetraplegia: an exploratory case study. *J Neurophysiol.* 2020;124(3):774–780. DOI: 10.1152/jn.00320.2020
18. Minyaeva AV, Moiseev SA, Pukhov AM, et al. Response of external inspiration to the movements induced by transcutaneous spinal cord stimulation. *Hum Physiol.* 2017;43:524–531. DOI: 10.1134/s0362119717050115
19. Keller A, Singh G, Sommerfeld JH, et al. Noninvasive spinal stimulation safely enables upright posture in children with spinal cord injury. *Nat. Commun.* 2021;12(1). DOI: 10.1038/s41467-021-26026-z
20. Joffe JR. The effect of functional electrical stimulation on abdominal muscle strength and gross motor function in children with cerebral palsy a randomised control trial [dissertation]. Cape Town: University of Cape Town; 2014.
21. Averybiomedical.com [Internet] Avery Biomedical devices – leader in diaphragm pacemakers [cited 2022 Dec 20]. Available from: <http://www.averybiomedical.com>
22. Dalal K, DiMarco AF. Diaphragmatic pacing in spinal cord injury. *Phys Med Rehabil Clin N Am.* 2014;25(3):619–629. DOI: 10.1016/j.pmr.2014.04.004
23. Posluszny JA Jr, Onders R, Kerwin AJ, et al. Multicenter review of diaphragm pacing in spinal cord injury: successful not only in weaning from ventilators but also in bridging to independent respiration. *J Trauma Acute Care Surg.* 2014;76(2):303–309. DOI: 10.1097/ta.000000000000112
24. Bakr SM, Knight J, Johnson SK, et al. Spinal cord stimulation improves functional outcomes in children with complex regional pain syndrome: case presentation and review of the literature. *Pain Pract.* 2020;20(6):647–655. DOI: 10.1111/papr.12882
25. DiMarco AF, Kowalski KE. Intercostal muscle pacing with high frequency spinal cord stimulation in dogs. *Respir Physiol Neurobiol.* 2010;171(3):218–24. DOI: 10.1016/j.resp.2010.03.017
26. Adachi T, Yokoyama M, Onuki T. Experimental evaluation of the optimal tidal volume for simultaneous pacing of the diaphragm and respiratory muscles. *J Artif Organs.* 2004;7(1):27–29. DOI: 10.1007/s10047-003-0246-4
27. Tator CH, Minassian K, Mushahwar VK. Spinal cord stimulation: therapeutic benefits and movement generation after spinal cord injury. *Handb Clin Neurol.* 2012;109:283–296. DOI: 10.1016/B978-0-444-52137-8.00018-8
28. Angeli CA, Edgerton VR, Gerasimenko YP, Harkema SJ. Altering spinal cord excitability enables voluntary movements after chronic complete paralysis in humans. *Brain.* 2014;137:1394–1409. DOI: 10.1093/brain/awu038
29. Harkema S, Gerasimenko Y, Hodes J, et al. Effect of epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: a case study. *Lancet.* 2011;377(9781):1938–1947. DOI: 10.1016/s0140-6736(11)60547-3
30. Saywell SA, Ford TW, Meehan CF, et al. Electrophysiological and morphological characterization of propriospinal interneurons in the thoracic spinal cord. *J Neurophysiol.* 2011;105(2):806–826. DOI: 10.1152/jn.00738.2010
31. Iizuka M, Onimaru H, Izumizaki M. Distribution of respiration-related neuronal activity in the thoracic spinal cord of the neonatal rat: an optical imaging study. *Neuroscience.* 2016;315:217–227. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2015.12.015
32. DiMarco AF, Kowalski KE. Activation of inspiratory muscles via spinal cord stimulation. *Respir Physiol Neurobiol.* 2013;189(2):438–449. DOI: 10.1016/j.resp.2013.06.001
33. DiMarco AF, Kowalski KE. Activation of the expiratory muscles via lower thoracic high frequency spinal cord stimulation in awake animals. *Respir Physiol Neurobiol.* 2020;276. DOI: 10.1016/j.resp.2019.103360
34. Toriya VG, Vissarionov SV, Kubanov RR, et al. Personalized application of electrostimulation techniques for correction and accelerated recovery of respiratory disorders in spinal cord injury. Certificate of DB registration. RU 2023621031, 2023. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

*** Вахтанг Гамлетович Тория**, врач-нейрохирург;
адрес: Россия, 196603, Санкт-Петербург,
Пушкин, ул. Парковая, д. 64–68;
ORCID: 0000-0002-2056-9726;
eLibrary SPIN: 1797-5031;
e-mail: vakdiss@yandex.ru

Сергей Валентинович Виссарионов, д-р мед. наук,
профессор, чл.-корр. РАН;
ORCID: 0000-0003-4235-5048;
ResearcherID: P-8596-2015;
Scopus Author ID: 6504128319;
eLibrary SPIN: 7125-4930;
e-mail: vissarionovs@gmail.com

Мargarita Владимировна Савина, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0001-8225-3885;
Scopus Author ID: 57193277614;
eLibrary SPIN: 5710-4790;
e-mail: drevma@yandex.ru

Алексей Георгиевич Баиндурашвили, д-р мед. наук,
профессор, академик РАН, заслуженный врач РФ;
ORCID: 0000-0001-8123-6944;
Scopus Author ID: 6603212551;
eLibrary SPIN: 2153-9050;
e-mail: turner011@mail.ru

Полина Андреевна Першина, ординатор;
ORCID: 0000-0001-5665-3009;
eLibrary SPIN: 2484-9463;
e-mail: polinaiva2772@gmail.com

AUTHOR INFORMATION

*** Vakhtang G. Toriya**, MD, Neurosurgeon;
address: 64-68 Parkovaya str., Pushkin,
Saint Petersburg, 196603, Russia;
ORCID: 0000-0002-2056-9726;
eLibrary SPIN: 1797-5031;
e-mail: vakdiss@yandex.ru

Sergei V. Vissarionov, MD, PhD, Dr. Sci. (Med.),
Professor, Corresponding Member of RAS;
ORCID: 0000-0003-4235-5048;
ResearcherID: P-8596-2015;
Scopus Author ID: 6504128319;
eLibrary SPIN: 7125-4930;
e-mail: vissarionovs@gmail.com

Margarita V. Savina, MD, PhD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0001-8225-3885;
Scopus Author ID: 57193277614;
eLibrary SPIN: 5710-4790;
e-mail: drevma@yandex.ru

Alexey G. Baidurashvili, MD, PhD, Dr. Sci. (Med.), Professor,
Member of RAS, Honored Doctor of the Russian Federation;
ORCID: 0000-0001-8123-6944;
Scopus Author ID: 6603212551;
eLibrary SPIN: 2153-9050;
e-mail: turner011@mail.ru

Polina A. Pershina, MD, resident;
ORCID: 0000-0001-5665-3009;
eLibrary SPIN: 2484-9463;
e-mail: polinaiva2772@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author