

НЕВРОЛОГИЯ И НЕЙРОХИРУРГИЯ NEUROLOGY AND NEUROSURGERY

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ СОПРЯЖЁННОСТИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЭМГ-АКТИВНОСТИ МЫШЦ И ПОРГОВ ВОСПРИЯТИЯ ТЕПЛА У БОЛЬНЫХ С ДЕФОРМАЦИЕЙ ПОЗВОНОЧНИКА

Богатырев М.А.,
Сайфутдинов М.С.,
Щурова Е.Н.

ФГБУ «Национальный медицинский
исследовательский центр
травматологии и ортопедии
имени академика Г.А. Илизарова»
Минздрава России (640014, г. Курган,
ул. Марии Ульяновой, 6, Россия)

Автор, ответственный за переписку:
Богатырев Максим Андреевич,
e-mail: 270419920000dok@gmail.com

РЕЗЮМЕ

Возникновение комбинированных сенсомоторных нарушений функции спинного мозга в сочетании с нарушениями функции вегетативной нервной системы после хирургической коррекции деформации позвоночника требует изучения механизмов взаимоотношения сенсомоторной и вегетативной нервной системы в условиях ятрогенных нарушений.

Цель работы. Изучение характера взаимодействия вегетативной и сенсомоторной систем на основе оценки взаимодействия тепловых порогов и интенсивности произвольной электромиографической (ЭМГ) активности.

Материалы и методы. Методом ЭМГ и эстеziометрии обследовано 87 больных в возрасте 6–43 лет с деформациями позвоночника разной этиологии до и после её хирургической коррекции.

Результаты. На основании сопоставления амплитуды электромиограммы при максимальном произвольном напряжении передней большеберцовой мышцы и порогов восприятия тепла выявлено существование интернейронного аппарата сопряжения чувствительности к теплу кожного рецептивного поля и произвольной активации мышцы при локализации её мотонейронного пула в том же сегменте спинного мозга. Данный рефлекторный механизм может быть использован в качестве базовой физиологической модели для изучения характера взаимодействия спинальных моторных и вегетативных центров в условиях ишемического повреждения спинного мозга при хирургической коррекции деформации позвоночника. На её основе возможно создание диагностических тестов для оценки степени нарушений взаимодействия сенсомоторной и вегетативной систем в условиях ятрогенных повреждений спинного мозга.

Ключевые слова: электромиография, эстеziометрия, спинной мозг, сколиоз

Статья поступила: 14.08.2023

Статья принята: 24.01.2025

Статья опубликована: 13.03.2025

Для цитирования: Богатырев М.А., Сайфутдинов М.С., Щурова Е.Н. Оценка степени сопряжённости произвольной ЭМГ-активности мышц и порогов восприятия тепла у больных с деформацией позвоночника. *Acta biomedica scientifica*. 2025; 10(1): 151–160. doi: 10.29413/ABS.2025-10.1.16

ASSESSMENT OF THE DEGREE OF CONJUGACY OF VOLUNTARY EMG ACTIVITY OF MUSCLES AND THRESHOLDS OF HEAT PERCEPTION IN PATIENTS WITH SPINAL DEFORMITY

**Bogatyrev M.A.,
Saifutdinov M.S.,
Shchurova E.N.**

National Ilizarov Medical Research Centre
for Traumatology and Ortopaedics
(Marii Ulyanovoy str. 6, Kurgan 640014,
Russian Federation)

Corresponding author:
Maksim A. Bogatyrev,
e-mail: 270419920000dok@gmail.com

ABSTRACT

The occurrence of combined sensorimotor disorders of spinal cord function in combination with disorders of the autonomic nervous system after surgical correction of spinal deformity requires studying the mechanisms of the relationship between the sensorimotor and autonomic nervous systems in conditions of iatrogenic disorders.

The aim. *To identify possible connections and their nature between the thresholds of heat perception and the amplitude of electrical activity of muscles at their maximal voluntary tension in patients with scoliosis for further use as a clinical model for studying the relationship between sensorimotor and autonomic nervous systems.*

Materials and methods. *Eighty-seven patients aged 6–43 years with spinal deformities of various etiologies were examined by electromyography and esthesiometry before and after its surgical correction.*

Results. *Based on the comparison of the electromyogram amplitude at the maximal voluntary tension of the anterior tibial muscle and the thresholds of heat perception, the presence of a reflex apparatus of conjugating the sensitivity to heat of the skin receptive field and voluntary activation of the muscle during localization of its motor neuron pool in the same segment of the spinal cord was established. This reflex mechanism can be used as a basic physiological model to study the nature of the interaction of spinal motor and autonomic centers in conditions of ischemic spinal cord injury during surgical correction of spinal deformity. It is possible to create diagnostic tests on its basis to assess the degree of violations of the interaction of the sensorimotor and autonomic systems in conditions of iatrogenic spinal cord injuries.*

Key words: *electromyography, esthesiometry, spinal cord, scoliosis*

Received: 14.08.2023
Accepted: 24.01.2025
Published: 13.03.2025

For citation: Bogatyrev M.A., Saifutdinov M.S., Shchurova E.N. Assessment of the degree of conjugacy of voluntary EMG activity of muscles and thresholds of heat perception in patients with spinal deformity. *Acta biomechanica scientifica*. 2025; 10(1): 151-160. doi: 10.29413/ABS.2025-10.1.16

Возникновение деформации позвоночника у детей и её развитие в процессе их роста представляет собой сложную ортопедическую проблему [1–4]. Хирургическая коррекция деформации позвоночника сопряжена с риском возникновения сенсорных и моторных осложнений вкпе с нарушениями работы вегетативной нервной системы [5–7]. Вышеперечисленные негативные последствия оперативного вмешательства могут возникать независимо друг от друга либо в различных комбинациях в соответствии с масштабами нарушения в системе кровоснабжения спинного мозга. В случае возникновения сложных сенсомоторных нарушений формируются патофизиологические механизмы взаимной стабилизации сенсорного и моторного компонентов неврологического нарушения, которые достаточно хорошо изучены [8], что способствует созданию эффективных высокотехнологичных способов реабилитации [9] с использованием электрической [10, 11] и магнитной [12] стимуляции, а также биологической обратной связи [13].

При комплексном возникновении нарушения сенсомоторных и вегетативных функций, например органов малого таза, ситуация не столь очевидна. Висцеральные механизмы регуляции автономны относительно сенсомоторных центров управления, и механизмы соматовегетативного барьера во многом остаются неизученными. Это затрудняет понимание наличия и степени взаимного влияния соответствующих послеоперационных нарушений, а значит и их комплексную эффективную реабилитацию. Однако данная проблема значительно шире, чем необходимость восстановления нарушенных функций, поскольку скрытое в норме фоновое взаимодействие моторных и вегетативных центров затрагивает практически все аспекты функционирования организма в норме и в патологии.

Для изучения этой проблемы целесообразно использовать клиническую модель сопряжённого функционирования сенсомоторных и вегетативных центров регуляции. Подобная модель была разработана на основе тонического защитного рефлекса [14], регулирующего состояние мотонейронных пулов на фоне хронического ирритирующего воздействия со стороны тканевых и болевых рецепторов в условиях травмы или хронического воспаления. Данная модель имеет существенные для нас ограничения, ввиду того что ноцицептивная активность проявляется на фоне полимодальной анестезии, коренным образом изменяющей межнейронные отношения в центральной нервной системе (ЦНС). Кроме того, сенсомоторные и вегетативные расстройства становятся заметны в послеоперационном периоде, т. е. на фоне угасания сенсорного потока из зоны хирургической агрессии.

Мы предлагаем в качестве клинической модели использовать физиологический механизм взаимодействия системы терморегуляции организма с центрами управления тонической активностью скелетной мускулатуры. Этот механизм согласовывает уровни восприятия температуры (в виде порогов тепла/холода, диапазона комфорта, чрезмерной жары/холода, созда-

ющих ситуацию стресса и т. п.) с состоянием тонической активности мышц от их расслабления при повышенной температуре к повышенному тону вплоть до появления ритмических разрядов двигательных единиц [15–18].

После хирургического вмешательства меняется восприятие тепла в сторону повышения (гипестезия) или понижения (гиперестезия) соответствующих порогов возникновения ощущения, регистрируемых методом эстеziометрии.

В послеоперационном периоде динамика рефлекторных изменений тонуса мышц будет накладываться на эффекты остаточного влияния компонентов анестезии, поэтому мы заменили регистрацию уровня тонической активности на измерение амплитуды произвольной ЭМГ при максимальном усилии, поскольку она так же подвержена охранительному торможению, но в меньшей степени зависит от последствия анестезии.

В связи с вышесказанным мы склонны высказать предположение о том, что пороги восприятия тепла как физиологический маркер зоны теплового комфорта организма должны быть сопряжены со значениями амплитуды ЭМГ при максимальном произвольном напряжении мышц, анатомически связанных с соответствующими кожными рецептивными полями. Однако данное предположение в настоящее время не может рассматриваться как полноценная научная гипотеза, поскольку не имеет под собой достаточных оснований.

Исходя из этого **целью работы** была оценка степени сопряжённости значений порогов восприятия тепла и амплитуды электрической активности мышц при их максимальном произвольном напряжении у пациентов с деформацией позвоночника как объективной основы данной гипотезы, которая позволит разработать клиническую модель взаимодействия сенсомоторной и вегетативной нервной систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выборка пациентов включала 87 больных (30 мужчин, 57 женщин) в возрасте 6–43 лет ($15,6 \pm 0,6$ года) с деформациями позвоночника ($20\text{--}105^\circ$ по сколиотическому и $15\text{--}134^\circ$ по кифотическому компоненту) различной этиологии. В качестве критерия включения рассматривались наличие деформации позвоночника не менее 15° и возраст пациентов от 6 до 45 лет. Нижняя граница возраста обусловлена необходимостью осознанного отношения пациента к выполнению эстеziометрического и электромиографического тестов. Верхняя граница связана с развитием дегенеративных изменений в осевом скелете и возрастных изменений в вегетативной нервной системе. В качестве критериев исключения рассматривалось наличие нейромышечной патологии и наличие нижней вялой параплегии.

Методом эстеziометрии с помощью электрического эстеziометра (EPCOS Inc., Германия) с учётом температуры кожи (Termostar; Nihon Kohden, Япония) при локальном нагревании её участка в симметричных точках

регистрировали пороги ощущения тепла кожных дерматомов, иннервируемых спинальными корешками Th₁ и L₅ (в соответствии с общепринятой схемой [19]). При отсутствии ощущения тепла констатировали термоанестезию. Площадь термоэлемента составляла 1 см², диапазон изменения температуры – 10–50°, скорость прироста температуры – 2 °C/с. Случаи термоанестезии исключались из анализа.

Методом ЭМГ с использованием цифровой системы Viking EDX (Natus Medical Incorporated, США) регистрировали электрическую активность *m. tibialis anterior* справа и слева при её максимальном произвольном напряжении (биполярное отведение накожными электродами диаметром 8 мм и межэлектродным расстоянием в 10 мм). Тест на максимальное напряжение выполнялся в течение 2–3 с, но не более, чтобы исключить влияние синхронизации активности двигательных единиц. Попытки повторялись 2–3 раза. Среди сделанных записей врач выбирал участок с максимальной активностью длительностью 1 с. В этом интервале автоматически рассчитывалась средняя амплитуда ЭМГ. Среди записей ЭМГ для дальнейшего анализа выбирались только электромиограммы с паттернами ненасыщенной активности, в которых колебания ЭМГ чередовались с периодами молчания разной длительности. Такие паттерны ЭМГ при накожном отведении называют залпообразными, а при игольчатом — редуцированными [20].

Контрольное тестирование ЭМГ и тепловых порогов в зависимости от состояния пациента проводилось в течение двух недель после операции.

Математическая обработка результатов осуществлялась при использовании программного комплекса Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corp., США) с пакетом анализа данных Attestat (v. 13.2, 16.02.2015) [21], а также SPSS Statistics (v. 21.0.0.0; IBM Corp., США). Для оценки характера статистического распределения количественных признаков использовались критерии Колмогорова – Смирнова, критерий асимметрии и критерий эксцесса. Поскольку для части групп сравнения статистическое распределение не удовлетворяло критериям нормальности, для их характеристики использовали значения медианы, первого и третьего квартилей в формате Me [Q₁; Q₃]. Статистическую значимость изменений медианы (при $p < 0,05$) в группах сравнения оценивали с помощью непарного критерия Вилкоксона.

Частоту встречаемости (v) качественных признаков (случаев наблюдения термоанестезии и ненасыщенных ЭМГ-паттернов), а также ошибку долей (s_v) рассчитывали в % по формулам:

$$v_i = \frac{n_i}{N} \times 100\% \quad (1);$$

$$s_v = \sqrt{\frac{v(1-v)}{N}} \quad (2),$$

где n_i – число наблюдений i -ого качественного признака; N – общее количество наблюдений в анализируемой выборке.

Статистическую значимость различий данной характеристики ($p < 0,05$) до и после операции оценивали с помощью непараметрических критериев χ^2 и z -критерия разности долей.

На основании полученных данных строились scatter-граммы, характеризующие взаимоотношение амплитуды ЭМГ и порогов тепла. На оси абсцисс отбрасывалась температура, соответствующая тепловым порогам. Ось ординат отображала значения амплитуды электрической активности мышц. Для аппроксимации полученных данных подбиралось уравнение из набора, представленного в Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corp., США), на основании максимизации значения коэффициента детерминации (R^2).

Всем пациентам выполнена коррекция деформации позвоночника с фиксацией сегментов грудного/грудно-поясничного отдела при помощи погружных транспедикулярных систем [22–24]. Анестезиологическое пособие было представлено тотальной внутривенной анестезией и включало сочетание гипнотика пропофола (10⁻² мг/кг/ч) с наркотическим анальгетиком фентанилом (10⁻¹ мкг/кг/ч), а также искусственную вентиляцию лёгких. На стадии интубации в качестве миорелаксанта использовался Эсмерон®.

Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России (протокол № 2(70) от 21.10.2021). Оно выполнялось в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинкской декларации с последующими изменениями. Пациенты, достигшие 18 лет, а также родители детей или их законные представители подписали информированное добровольное согласие на проведение диагностических исследований и публикацию данных без идентификации личности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В анализируемой выборке в предоперационном периоде случаи термоанестезии для рецептивного поля, связанного с сегментом L₅, составили 55,0 ± 5,56 %, а для контрольного рецептивного поля Th₁ – 28,0 ± 4,96 % ($p < 0,05$) (рис. 1). После исключения случаев термоанестезии медианные значения порогов восприятия тепла для рецептивных полей L₅ и Th₁ составили 40 [39,5; 43] и 35 [33,0; 36,0] °C соответственно. Для поясничного сегмента спинного мозга общевыборочный порог восприятия тепла был статистически значимо выше на 5° ($p < 0,05$), чем для верхнегрудного.

Медианное значение амплитуды ЭМГ в анализируемой выборке составило 0,47 [0,33; 0,62] мВ. При исключении случаев термоанестезии рецептивного поля L₅ среди оставшихся паттернов ЭМГ ненасыщенные составляют 47,2 ± 8,32 % (рис. 2), а в контрольной выборке (для рецептивного поля Th₁) – 42,4 ± 6,43 % ($p > 0,05$) (рис. 3).

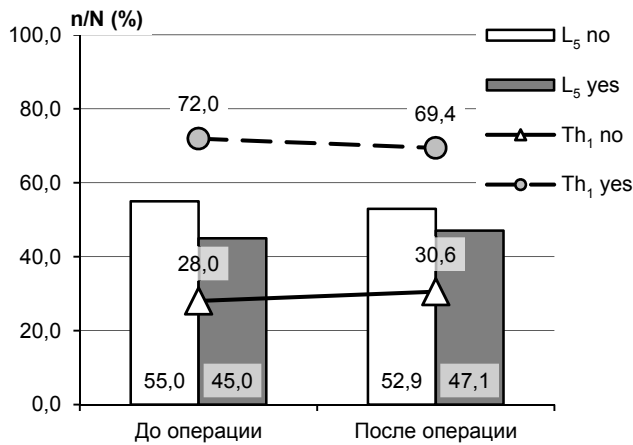


РИС. 1.

Доля случаев термоанестезии (no) и зафиксированных порогов ощущения тепла (yes) при тестировании рецептивных полей дерматомов Th₁ и L₅

FIG. 1.

The proportion of cases of thermoanesthesia (no) and fixed thresholds of heat sensation (yes) when testing the receptive fields of Th₁ and L₅ dermatomes

При сопоставлении в предоперационном периоде множества пар значений найдено, что амплитуда ЭМГ связана с порогом ощущения тепла (рецептивное поле L₅; рис. 4) с максимальным коэффициентом детерминации $R^2 = 0,491$ уравнением $A_{\text{EMG}} = aT^2 + bT + c$, где A_{EMG} – амплитуда ЭМГ при максимальном произвольном напряжении; T – порог ощущения тепла; a , b и c – коэффициенты связи. Вид аппроксимационного уравнения сохраняется для скатерограммы контрольного рецептивного поля Th₁ (рис. 5), однако при этом R^2 был существенно ниже и составлял 0,193.

В послеоперационном периоде медианное значение общевыборочной амплитуды ЭМГ снизилось по сравнению с исходным уровнем на 10,6 % ($p > 0,05$) и составило 0,42 [0,28; 0,60] мВ. При этом количество наблюдений термоанестезии для рецептивного поля L₅ несущественно

($p > 0,05$) снизилось (рис. 1) – с $55,0 \pm 5,56$ до $52,9 \pm 6,05$ %, а для рецептивного поля Th₁ – незначительно ($p > 0,05$) возросла, с $28,0 \pm 4,96$ до $30,6 \pm 5,42$ %. Изменения носят случайный характер. Термоаналгезия в послеоперационном периоде не выявлена.

После хирургической коррекции деформации позвоночника доля ненасыщенных ЭМГ-паттернов несущественно ($p > 0,05$) снизилась – с $47,7 \pm 5,32$ до $40,2 \pm 5,78$ %. Это не могло не отразиться на частоте встречаемости данных паттернов после исключения случаев термоанестезии для обеих групп рецептивных полей (рис. 3), однако для L₅ данное снижение было более выраженным – до $28,1 \pm 7,95$ % (на 19,1 %; $p > 0,05$) – в сравнении с контрольным рецептивным полем (на 6,4 %; $p > 0,05$).

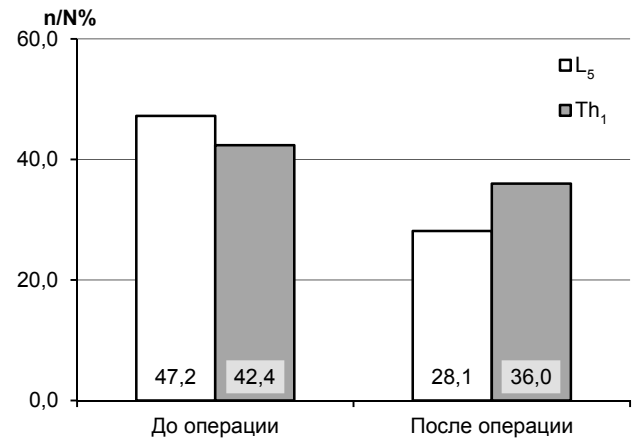


РИС. 3.

Процентное соотношение ненасыщенных паттернов ЭМГ-активности m. tibialis anterior для рецептивных полей L₅ и Th₁ до и после оперативного вмешательства (с учётом исключённых случаев термоанестезии)

FIG. 3.

Percentage ratio of unsaturated patterns of m. tibialis anterior EMG activity for L₅ and Th₁ receptive fields before and after surgery (taking into account excluded cases of thermoanesthesia)

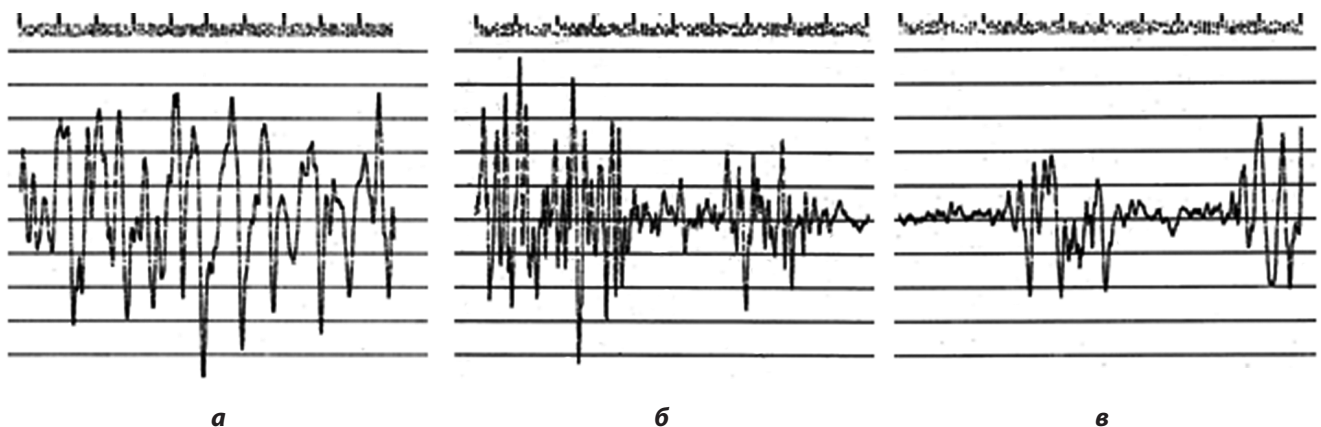


РИС. 2.

Примеры насыщенных (а) и ненасыщенных (б, в) паттернов ЭМГ-активности при выполнении теста на максимальное произвольное напряжение: вверху – шкала времени с интервалом 1 с (10 больших делений)

FIG. 2.

Examples of saturated (a) and unsaturated (б, в) patterns of EMG activity when performing a test for maximum arbitrary voltage: at the top – a time scale with an interval of 1 second (10 large divisions)

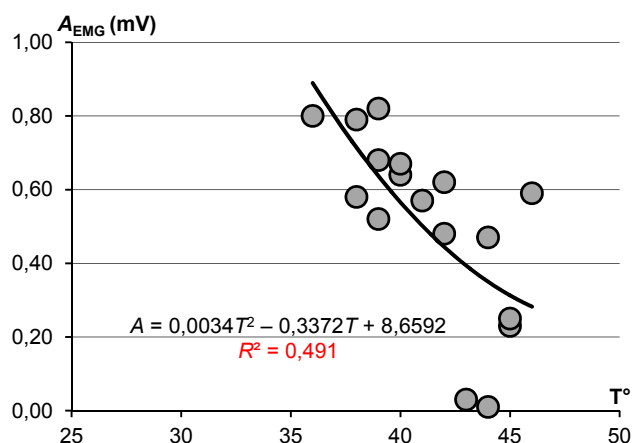


РИС. 4.

Сопоставление амплитуды ЭМГ *m. tibialis anterior* со значениями порогов тепловой чувствительности дерматомы L_5 в предоперационном периоде

FIG. 4.

Comparison of the *m. tibialis anterior* EMG amplitude with the values of the thresholds of L_5 dermatome thermal sensitivity in the preoperative period

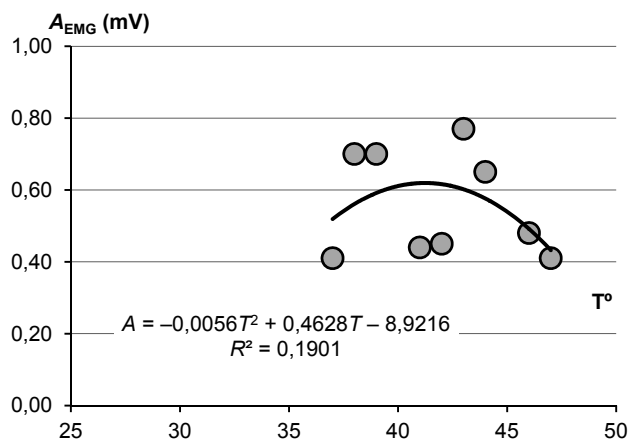


РИС. 6.

Сопоставление амплитуды ЭМГ *m. tibialis anterior* со значениями порогов тепловой чувствительности дерматомы L_5 в послеоперационном периоде

FIG. 6.

Comparison of the *m. tibialis anterior* EMG amplitude with the values of the thresholds of L_5 dermatome thermal sensitivity in the postoperative period

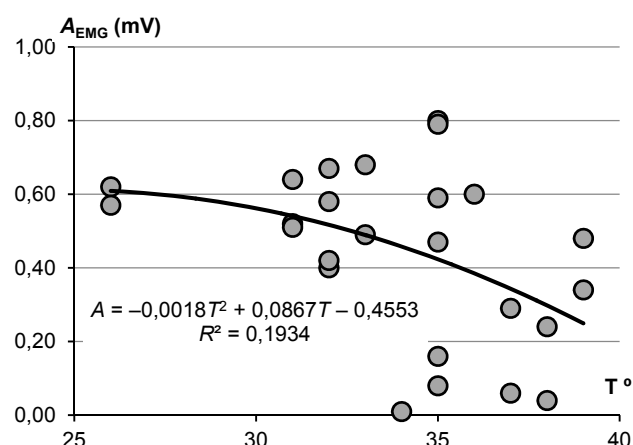


РИС. 5.

Сопоставление амплитуды ЭМГ *m. tibialis anterior* со значениями порогов тепловой чувствительности дерматомы Th_1 в предоперационном периоде

FIG. 5.

Comparison of the *m. tibialis anterior* EMG amplitude with the values of the thresholds of Th_1 dermatome thermal sensitivity in the preoperative period

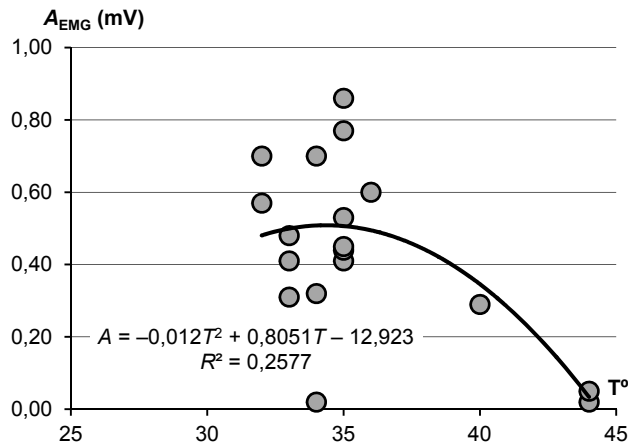


РИС. 7.

Сопоставление амплитуды ЭМГ *m. tibialis anterior* со значениями порогов тепловой чувствительности дерматомы Th_1 в послеоперационном периоде

FIG. 7.

Comparison of the *m. tibialis anterior* EMG amplitude with the values of the thresholds of Th_1 dermatome thermal sensitivity in the postoperative period

При этом для скатерограмм рецептивного поля L_5 существенно упало качество аппроксимации данных (коэффициент детерминации снизился до 0,190) при сохранении того же вида уравнения (рис. 6). Для рецептивного поля Th_1 значения коэффициента детерминации также оставались низкими (рис. 7) на уровне случайного совпадения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведённые данные показывают, что в предоперационном периоде изменения анализируемых параметров для контрольного сегмента спинного мозга Th_1 менее выражены, чем для интересующего нас сегмента L_5 . Это объясняется тем, что контрольный сегмент лежит выше области деформации позвоночника.

Во всех случаях значения коэффициентов детерминации указывают на низкое качество аппроксимации взаимной сопряжённости тепловых порогов и амплитудой произвольной ЭМГ. Естественно, вряд ли можно ожидать прямой функциональной связи между данными характеристиками разных и в высокой степени автономных относительно друг друга физиологических систем. На них разнонаправленно влияет множество разнородных факторов. Однако при сопоставлении тепловых порогов с амплитудой ненасыщенных паттернов ЭМГ значения R^2 для рецептивного поля L_5 в предоперационном периоде существенно отличаются от соответствующих значений контрольного рецептивного поля всех групп с насыщенной ЭМГ и всех скатерограмм после операции. То есть для контрольного рецептивного поля Th_1 можно считать, что вся совокупность индивидуальных наблюдений (точек на скатерограммах) до операции и после неё распределена случайным образом. Это не удивительно, поскольку кожные рецептивные поля, соответствующие сегменту Th_1 , вряд ли имеют прямые рефлекторные связи с мотонейронами двигательного ядра передней большеберцовой мышцы, которые

локализованы преимущественно в сегменте L_5 спинного мозга. Поэтому существенно превосходящая величина коэффициента детерминации для аппроксимации распределения множества пар значений амплитуд ЭМГ и тепловых порогов рецептивного поля L_5 по сравнению с рецептивным полем Th_1 позволяет предположить существование некоторого интернейронного механизма сопряжения системы баланса чувствительности кожи к температуре с активностью спинального моторного ядра *m. tibialis anterior* как более близкого к дерматому L_5 относительно контрольного дерматомы Th_1 (рис. 8). Этот механизм, очевидно, является фрагментом общего терморегуляторного комплекса, ответственного за участие мышц в поддержании теплового баланса тела. Действие его зависит от ряда условий, в частности от физиологической роли конкретной мышцы и от степени отклонения температуры среды от зоны температурного комфорта [15–18]. Но, тем не менее, на всех скатерограммах независимо от качества аппроксимации мы видим тенденцию к уменьшению амплитуды произвольной ЭМГ при увеличении порогов восприятия тепла. Это соответствует современным представлениям о работе тер-

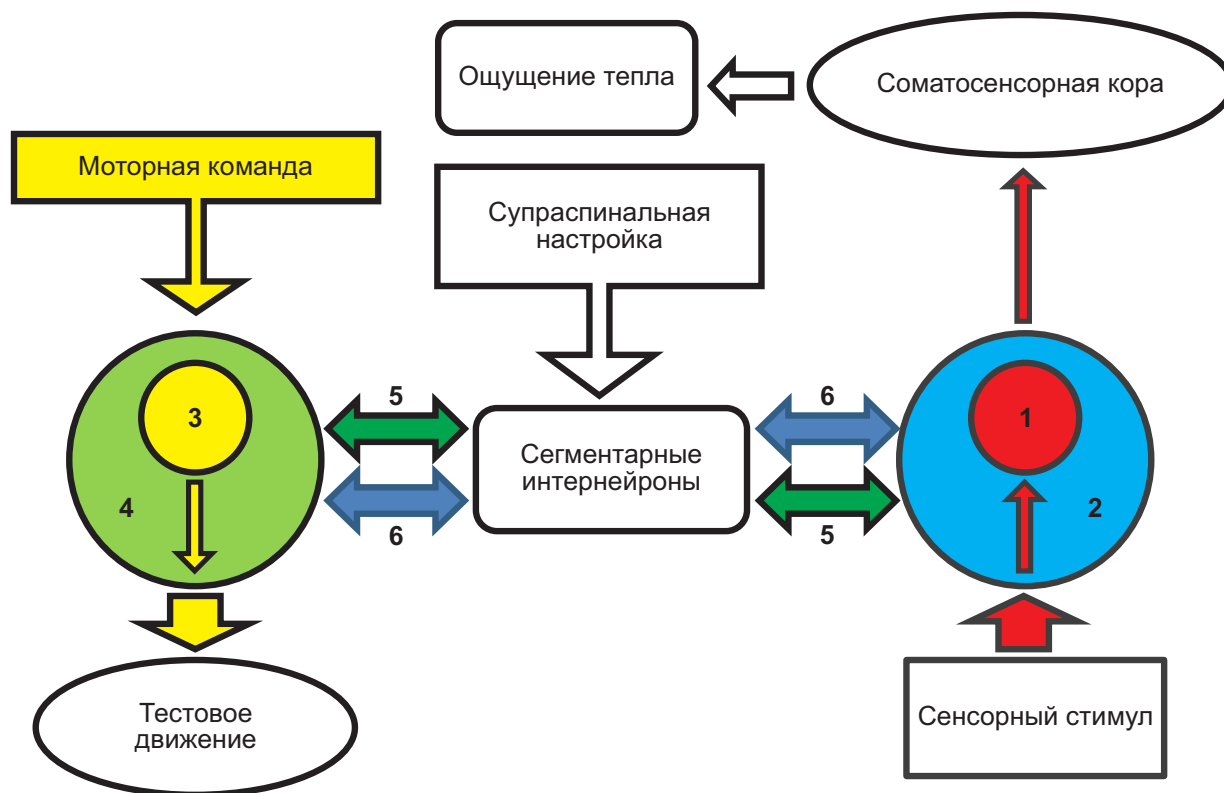


РИС. 8.
Рефлекторный механизм сопряжения уровня восприятия тепла (значения тепловых порогов) и интенсивности максимального произвольного напряжения (амплитуды ЭМГ) *m. tibialis anterior*: **1** – активный ансамбль сенсорных нейронов, ответственных за восприятие тепла; **2** – весь пул сенсорных нейронов; **3** – активный пул альфа-мотонейронов, активированный центральной моторной командой; **4** – двигательное ядро *m. tibialis anterior*; **5** – активирующие интрасегментарные связи; **6** – тормозные интрасегментарные связи

FIG. 8.
Reflex mechanism of coupling the level of heat sensation (thermal threshold values) and the intensity of maximum arbitrary voltage (EMG amplitude) of *m. tibialis anterior*: **1** – an active ensemble of sensory neurons responsible for heat sensation; **2** – the entire pool of sensory neurons; **3** – an active pool of alpha motor neurons activated by the central motor command; **4** – *m. tibialis anterior* motor nucleus; **5** – activating intrasegmental connections; **6** – inhibitory intrasegmental connections

морегуляторной системы. Чем выше температура среды, тем выше порог восприятия тепла, при этом в большей степени тормозится активность моторной системы.

Сопоставление качества аппроксимации температурно-моторного сопряжения (рис. 4, 5) позволяет предположить, что рассматриваемый механизм преимущественно интрасегментарный, поскольку коэффициент детерминации для рецептивного поля Th_1 существенно ниже, чем для L_5 , т. е. фактически на уровне случайных событий. Однако предлагаемая модель должна учитывать наличие модулирующих супраспинальных влияний. Их характер требует уточнения, однако, поскольку наблюдаемая температурно-моторная сопряженность проявляется при ненасыщенной ЭМГ, можно предположить, что существующую часть супраспинальных модулирующих влияний составляют нисходящие воздействия со стороны тонических центров ствола мозга [20].

Сразу после операции функция интернейронных механизмов сопряжения восприятия тепла и уровня активации *m. tibialis anterior* существенно дезинтегрированы, что проявляется в существенном снижении коэффициента детерминации (рис. 5). Важный вклад в этот феномен вносит эффект последствия анестезии, для которого характерно неспецифическое дезинтегрирующее воздействие на все связи в ЦНС [25, 26]. На это косвенно указывает снижение доли ненасыщенных ЭМГ-паттернов в послеоперационном периоде. Поскольку анестетики подавляют активность центров ствола мозга, регулирующих тоническую активность мышц, тот факт, что это понижение более выражено для рецептивного поля L_5 , подтверждает рефлекторную природу данного механизма. Существенную роль должно играть также и усиление интероцептивной импульсации (в том числе и ноцицептивной) из зоны хирургического интереса, оказывающее тормозное действие на альфа-мотонейроны через механизм защитного тонического рефлекса [14] с участием системы воротного контроля [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные нами результаты позволяют сформулировать гипотезу относительно функционирования интернейронного аппарата сопряжения сенсорных механизмов восприятия тепла и уровня произвольной активации мышцы, мотонейронный пул которой локализован в сегменте спинного мозга, иннервирующем соответствующее кожное рецептивное поле. После соответствующей проверки этой гипотезы данный рефлекторный механизм может быть использован в качестве базовой физиологической модели для изучения характера взаимодействия спинальных моторных и вегетативных центров в условиях ишемического повреждения спинного мозга в результате спинальной травмы и при хирургической коррекции деформации позвоночника.

Как было показано выше, хирургическая агрессия в сочетании с анестезией значительно модифицирует функционирование данного механизма сопряжения даже при отсутствии ятрогенного повреждения.

При наличии последнего потребуется разработка факторов кондиционирования механизмов моторно-вегетативного сопряжения (например, усиления/ослабления симпатического или парасимпатического влияния) для повышения эффективности срочных восстановительных мероприятий в раннем послеоперационном периоде даже при отсутствии клинически неблагоприятных признаков и последующей реабилитации у пациентов с клинически выраженными нарушениями моторной и висцеральной функций. Учитывая простоту проведения ЭМГ-теста на максимальное произвольное напряжение в сочетании с эстезиометрией, в дальнейшем возможно создание диагностических тестов на основе данной клинической модели в изучении взаимоотношений сенсомоторной и вегетативной систем в условиях ятрогенных повреждений спинного мозга.

Ограничения

Исследование физиологических функций пациентов с деформацией позвоночника сталкивается с проблемой большой вариативности исходных клинических показателей. Это затрудняет получение большого объема статистически однородных выборок. Поэтому высокая разнородность возраста и выраженности ортопедической патологии у субъектов усиливает вариативность анализируемых признаков и затрудняет их статистическую оценку и интерпретацию.

Финансирование

Исследование выполнено без использования спонсорских средств.

Конфликт интересов

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

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Зейналов Ю.Л., Бурцев А.В., Дьячкова Г.В., Дьячков К.А. «Синдромокомплекс» идиопатического сколиоза. *Гений ортопедии*. 2023; 29(1): 49-56. [Zeynalov YuL, Burtsev AV, Diachkova GV, Diachkov KA. Idiopathic scoliosis "syndromocomplex". *Genij Ortopedii*. 2023; 29(1): 49-56. (In Russ.)]. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-1-49-56
2. Михайловский М.В., Суздалов В.А. Возможности хирургической коррекции деформаций позвоночника у пациентов с синдромом Ehlers – Danlos. Несистематический обзор. *Гений ортопедии*. 2023; 29(1): 99-103. [Mikhailovsky MV, Suzdalov VA. Surgical correction of spinal deformities in patients with Ehlers – Danlos syndrome. Non-systematic review. *Genij Ortopedii*. 2023; 29(1): 99-103. (In Russ.)]. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-199-103
3. Никитюк И.Е., Виссарионов С.В. Особенности опорной функции стоп у детей с тяжелыми формами идиопатического сколиоза до и после хирургического лечения. *Гений ортопедии*. 2021; 27(6): 758-766. [Nikityuk IE, Vissarionov SV. Supporting function of the feet in children with severe forms of idiopathic scoliosis

before and after surgical treatment. *Genij Ortopedii*. 2021; 27(6): 758-766. (In Russ.)). doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-6-758-766

4. Филатов Е.Ю., Рябых С.О., Савин Д.М. Алгоритм лечения врожденных аномалий позвоночника. *Гений ортопедии*. 2021; 27(6): 717-726. [Filatov EYu, Ryabykh SO, Savin DM. Algorithm for the treatment of congenital anomalies of the spine. *Genij Ortopedii*. 2021; 27(6): 717-726. (In Russ.)). doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-6-717-726

5. Ajiboye RM, Park HY, Cohen JR, Vellios EE, Lord EL, Ashana AO, et al. Demographic trends in the use of intraoperative neuromonitoring for scoliosis surgery in the United States. *Int J Spine Surg*. 2018; 12(3): 393-398. doi: 10.14444/5046

6. Holdefer RN, Skinner SA. Motor evoked potential recovery with surgeon interventions and neurologic outcomes: A meta-analysis and structural causal model for spine deformity surgeries. *Clin Neurophysiol*. 2020; 131(7): 1556-1566. doi: 10.1016/j.clinph.2020.03.024

7. Nagarajan L, Ghosh S, Dillon D, Palumbo L, Woodland P, Thalasingam P, et al. Intraoperative neurophysiology monitoring in scoliosis surgery in children. *Clin Neurophysiol Pract*. 2019; 4: 11-17. doi: 10.1016/j.cnp.2018.12.002

8. Hubli M, Dietz V. The physiological basis of neurorehabilitation-locomotor training after spinal cord injury. *J Neuroeng Rehabil*. 2013; 10: 5. doi: 10.1186/1743-0003-10-5

9. Alemanno F, Houdayer E, Emedoli D, Locatelli M, Mortini P, Mandelli C, et al. Efficacy of virtual reality to reduce chronic low back pain: Proof-of-concept of a nonpharmacological approach on pain, quality of life, neuropsychological and functional outcome. *PLoS One*. 2019; 14(5): e0216858. doi: 10.1371/journal.pone.0216858

10. Мошонкина Т.Р., Макаровский А.Н., Богачева И.Н., Щербакоева Н.А., Савохин А.А., Герасименко Ю.П. Эффекты электрической стимуляции спинного мозга у пациентов с вертебро-спинальной патологией. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 2012; 153(1): 21-26. [Moshonkina TR, Makarovskiy AN, Bogacheva IN, Scherbakova NA, Savokhin AA, Gerasimenko YuP. Effects of spinal cord electrical stimulation in patients with vertebrospinal pathology. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2012; 153(1): 16-20. (In Russ.)). doi: 10.1007/s10517-012-1632-9

11. Bergmann M, Zahharova A, Reinvee M, Asser T, Gapayeva H, Vahtrik D. The effect of functional electrical stimulation a therapeutic exercises on trunk muscle tone and dynamic sitting balance in persons with chronic spinal cord injury: A crossover trial. *Medicina*. 2019; 55: 619. doi: 10.3390/medicina55100619

12. Войтенков В.Б., Екушева Е.В. Транскраниальная магнитная стимуляция в клинической практике; 2-е изд., испр. и доп. СПб.; М.; 2022. [Voitenkov VB, Ekusheva EV. *Transcranial magnetic stimulation in clinical practice*; 2nd edition corrected and supplemented. Saint Petersburg; Moscow; 2022. (In Russ.)).

13. Бутуханов В.В., Сороковиков В.А., Арсентьева Н.И. Динамика параметров электромиограммы мышц спины при применении биорезонансной терапии и ЭМГ-обратной связи у пациентов в возрасте от 6 до 18 лет со сколиотической деформацией I-II степени. *Acta biomedica scientifica*. 2011; 4(80-1): 34-37. [Butukhanov VV, Sorokovikov VA, Arsentieva NI. Dynamics of bioelectrical brain activity at use of bioresonance therapy and electromyogram feedback in patients with scoliotic deformation of I-II degree in different periods of ontogenesis. *Acta biomedica scientifica*. 2011; 4(80-1): 34-37. (In Russ.)).

14. Алатырев В.И., Еремеев А.М., Плещинский И.Н. Влияние длительного ноцицептивного раздражения на двигательные функции человека. *Физиология человека*. 1990; 16(3): 77-83. [Alatyrev VI, Eremeev AM, Pleshchinskii IN. The effect of long-term nociceptive stimulation on human motor functions. *Human Physiology*. 1990; 16(3): 77-83. (In Russ.)).

15. Лупандин Ю.В., Мейгал А.Ю., Антонен Е.Г. Влияние охлаждения и согревания на функцию двигательных единиц у больных разными клиническими формами паркинсонизма. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 1996; 96(6): 86-87. [Lupandin YuV, Meigal AYU, Antonen EG. The effect of body cooling and warming on motor unit function in patients with different clinical forms of parkinsonism. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 1996; 96(6): 86-87. (In Russ.)).

16. Мейгал А.Ю., Герасимова Л.И., Золотова Е.В., Лупандин Ю.В. Произвольное рекрутирование двигательных единиц в условиях холодовой дрожи. *Физиология человека*. 1997; 23(5): 64-68. [Meigal AYU, Gerasimova LI, Zolotova EV, Lupandin IV. Voluntary recruiting of motor units under conditions of cold shivering. *Human Physiology*. 1997; 23(6): 64-68. (In Russ.)).

17. Мейгал А.Ю., Письменный К.Н. Влияние общего согревания и охлаждения организма на постактивационный эффект в мышцах верхних конечностей. *Физиология человека*. 2009; 35(1): 51-57. [Meigal AYU, Pismennyi KN. The influence of total body warming and cooling on aftercontraction effect in the upper limb muscles. *Human Physiology*. 2009; 35(1): 60-66. (In Russ.)).

18. Meigal AYU, Lupandin YuV, Hänninen O. Influence of cold and hot conditions on postactivation in human skeletal muscles. *Pflugers Archive Eur J Physiol*. 1996; 432(4): 121. doi: 10.1007/s004240050113

19. Hansen R, Schliack H. *Segmentale innervation*. Stuttgart: Thieme; 1962.

20. Команцев В.Н. Методические основы клинической электронейромиографии: руководство для врачей. СПб.; 2006. [Komantsev VN. *Methodological foundations of clinical electroneuromyography: Guide for physicians*. Saint Petersburg; 2006. (In Russ.)).

21. Гайдышев И.П. Анализ и обработка данных: специальный справочник. СПб.: Питер; 2001. [Gaidyshev IP. *Data analysis and processing: Special reference book*. Saint Petersburg: Piter; 2001. (In Russ.)).

22. Рябых С.О. Применение двойного деротационного маневра для коррекции сколиозов тяжелой степени. *Гений ортопедии*. 2013; (4): 71-75. [Ryabykh SO. The use of double derotation maneuver to correct severe scoliosis. *Genij Ortopedii*. 2013; (4): 71-75. (In Russ.)).

23. Рябых С.О., Савин Д.М. Возможности оперативного лечения кифоза III типа методом «Pedicel subtraction osteotomy». *Гений ортопедии*. 2013; (1): 120-123. [Ryabykh SO, Savin DM. Possibilities of type III kyphoses surgical treatment using «Pedicel subtraction osteotomy» technique. *Genij Ortopedii*. 2013; (1): 120-123. (In Russ.)).

24. Рябых С.О., Савин Д.М., Медведева С.Н., Губина Е.Б. Опыт лечения нейрогенных деформаций позвоночника. *Гений ортопедии*. 2013; (1): 87-92. [Ryabykh SO, Savin DM, Medvedeva SN, Gubina EB. The experience in treatment of the spine neurogenic deformities. *Genij Ortopedii*. 2013; (1): 87-92. (In Russ.)).

25. Craig MM, Misisic B, Pappas I, Adapa RM, Menon DK, Stamatakis EA. Propofol sedation-induced alterations in brain connectivity reflect parvalbumin interneurone distribution in human cerebral cortex. *Br J Anaesth*. 2021; 126(4): 835e844. doi: 10.1016/j.bja.2020.11.035

26. Heinke W, Koelsch S. The effects of anesthetics on brain activity and cognitive function. *Curr Opin Anaesthesiol*. 2005; 18(6): 625-631. doi: 10.1097/01.aco.0000189879.67092.12

27. Melzack R, Wall PD. Pain mechanisms: A new theory. *Science*. 1965; 150(3699): 971-978. doi: 10.1126/science.150.3699.971

Сведения об авторах

Богатырев Максим Андреевич – аспирант, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России, e-mail: 270419920000dok@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4637-2435>

Сайфутдинов Марат Саматович – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник научной лаборатории Клиники патологии позвоночника и редких заболеваний, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России, e-mail: maratasaif@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7477-5250>

Щурова Елена Николаевна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник научной лаборатории Клиники патологии позвоночника и редких заболеваний, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России, <https://orcid.org/0000-0003-0816-1004>

Information about the authors

Maksim A. Bogatyrev – Postgraduate, National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, e-mail: 270419920000dok@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4637-2435>

Marat S. Saifutdinov – Dr. Sc. (Biol.), Leading Research Officer at the Clinical Laboratory, Clinic of Spine Pathology and Rare Diseases, National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, e-mail: maratasaif@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7477-5250>

Elena N. Shchurova – Dr. Sc. (Med.), Leading Research Officer at the Clinical Laboratory, Clinic of Spine Pathology and Rare Diseases, National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, <https://orcid.org/0000-0003-0816-1004>

Вклад авторов

Богатырев М.А. – концепция и дизайн исследования; анализ архивного материала; обработка данных; написание текста статьи; редактирование текста статьи.

Сайфутдинов М.С. – концепция и дизайн исследования; статистическая обработка материала; написание текста статьи; редактирование текста статьи.

Щурова Е.Н. – концепция и дизайн исследования; написание текста статьи; редактирование текста статьи.

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