

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОАНЕСТЕЗИИ НА СОСТОЯНИЕ СПИНАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА НА ФОНЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОЗВОНОЧНИКА

Богатырев М.А.¹, Сайфутдинов М.С.¹, Щурова Е.Н.¹, Очирова П.В.¹

¹ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Курган, e-mail: office@rncvto.ru

На сегодняшний день недостаточно хорошо изучено взаимодействие сенсомоторной и вегетативной нервной систем, что в условиях хирургического вмешательства, затрагивающего спинной мозг при коррекции деформации позвоночника, в той или иной степени может затруднять проведение реабилитационного процесса. Цель исследования заключалась в выявлении характера влияния состояния вегетативной нервной системы на функцию спинальных моторных центров в условиях оперативной коррекции деформации позвоночника. 87 больных (15,6±0,6 года) с деформациями позвоночника различной этиологии обследованы методом эстеziометрии (определение порогов восприятия тепла) и электромиографии (тест на максимальное произвольное напряжение) до и после их оперативной коррекции. Сравнивали электромиографические характеристики в группе пациентов с сохранённым и нарушенным восприятием тепла. Соотношение амплитуды электромиограммы передней большеберцовой мышцы при максимальном произвольном напряжении и частоты её колебаний у пациентов с деформацией позвоночника хорошо описывается степенной функцией. Оперативная коррекция деформации позвоночника ведёт к развитию спинального торможения активности α -мотонейронов, более выраженному в группе с нарушением восприятия тепла. Таким образом, состояние терморцепции, являющейся сенсорным входом вегетативной нервной системы, модулирует степень центрального торможения мотонейронов под влиянием хирургического вмешательства.

Ключевые слова: эстеziометрия, электромиография, спинной мозг, деформация позвоночника.

THE EFFECT OF THERMAL ANESTHESIA ON THE CONDITION OF THE SPINAL MOTOR CENTER AGAINST THE BACKGROUND OF SPINAL DEFORMITY

Bogatyrev M.A.¹, Saifutdinov M.S.¹, Shchurova E.N.¹, Ochirova P.V.¹

¹Federal State Budgetary Institution National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics of the RF Ministry of Health, Kurgan, e-mail: office@rncvto.ru

To date, the interaction of the sensorimotor and autonomic nervous systems has not been well studied, which in conditions of surgical intervention affecting the spinal cord during correction of spinal deformity to one degree or another may complicate the rehabilitation process. The aim of the study was to identify the nature of the influence of the state of the autonomic nervous system on the function of spinal motor centers in the conditions of surgical correction of spinal deformity. 87 patients aged 15.6±0.6 years with spinal deformities of various etiologies were examined by estesiometry (determination of heat perception thresholds) and electromyography (test for maximum arbitrary voltage) before and after their surgical correction. Electromyographic characteristics were compared in a group of patients with preserved and impaired heat perception. The ratio of the amplitude of the electromyogram of the anterior tibial muscle at maximum arbitrary tension and the frequency of its oscillations in patients with spinal deformity is well described by a power function. Surgical correction of spinal deformity leads to the development of spinal inhibition of the activity of α -motor neurons, more pronounced in the group with impaired heat perception. Thus, the state of thermoreception, which is the sensory input of the autonomic nervous system, modulates the degree of central inhibition of motor neurons under the influence of surgical intervention.

Keywords: estesiometry, electromyography, spinal cord, spinal deformity.

Введение

Растущий детский организм сталкивается с возникновением ряда проблем, например с развитием деформации позвоночника, что оказывает многообразное влияние на состояние практически всех органов и систем [Ошибка! Источник ссылки не найден.], в том числе и на взаимоотношение вегетативной и сенсомоторной нервной системы. В отдельности состояние сенсомоторной и вегетативной нервной системы в условиях деформации осевого

скелета неплохо изучены. Но характер их взаимодействия остаётся за рамками внимания врачей и исследователей ввиду ряда методологических сложностей. Однако данная физиологическая проблема становится крайне важной в случае возникновения комплексных послеоперационных неврологических осложнений в результате хирургической коррекции деформации позвоночника [Ошибка! Источник ссылки не найден.-Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Соответствующая информация может быть весьма полезной для проведения эффективных реабилитационных мероприятий. В качестве основы клинической модели изучения вегетосоматических отношений может быть использовано хорошо изученное взаимодействие систем терморцепции и тонической регуляции мышечной активности в рамках общей терморегуляции [5-6]. Установочный уровень активности терморегуляторной системы отражается в порогах восприятия тепла и боли от горячего, которые можно оценить методом эстеziометрии [7]. Однако прямое сопоставление данных эстеziометрии и тонической активности мышц пациентов со сколиозом затруднено тем, что в послеоперационном периоде тоническая активность мышц во многом определяется последствиями перенесённой анестезии. В связи с этим мы сопоставляли пороги восприятия тепла с амплитудой электрической активности мышцы при максимальном произвольном напряжении при условии, что её спинальный моторный центр локализован в том же сегменте, что и соответствующее рецептивное поле.

Целью исследования было выявление характера влияния состояния вегетативной нервной системы на функцию спинальных моторных центров в условиях оперативной коррекции деформации позвоночника.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено на 87 больных (30 мужского, 57 женского пола), в возрасте 6-43 лет ($15,6 \pm 0,6$ года) с деформациями позвоночника ($20-105^\circ$ по сколиотическому и $15-134^\circ$ - по кифотическому компоненту) различной этиологии до и после их оперативной коррекции. Методом эстеziометрии [7] регистрировали пороги ощущения тепла кожного дерматома, иннервируемого спинальными корешками L₅. Пациенты распределялись на две группы сравнения: 1) с нарушенным восприятием тепла (**NO**), когда тепловые пороги зарегистрировать не удалось; 2) с сохранённым восприятием тепла (**YES**), когда тепловые пороги регистрируются с помощью эстеziометрии.

Методом электромиографии (ЭМГ) получали электрическую активность m. tibialis anterior при её максимальном произвольном напряжении. Из анализа исключались записи ЭМГ с паттернами ненасыщенной активности, в которых колебания биопотенциалов чередовались с периодами молчания разной длительности.

Для групп сравнения (**NO**) и (**YES**) строились скатерограммы, так что ось абсцисс была шкалой частоты ЭМГ, а по оси ординат откладывалась её амплитуда. Оценивалось совпадение/расхождение территорий, занимаемых множеством наблюдений сравниваемых групп. С помощью средств аппроксимации Excel 2010 выбиралось уравнение с максимальным значением коэффициента детерминации (R^2). Обследования проводились до и через две недели после хирургической коррекции деформации позвоночника.

Локальный этический комитет ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации одобрил данное исследование (протокол № 2(70) от 21.10.2021). Его выполнение соответствует этическим стандартам, которые изложены в Хельсинкской декларации с последующими изменениями. Совершеннолетние пациенты, родители детей или их законные представители дали письменное информированное добровольное согласие на проведение диагностических исследований и публикацию полученных данных без идентификации личности.

Результаты исследования и их обсуждение

В виде скатерограммы (рис. 1) представлено распределение значений амплитуды ЭМГ при максимальном произвольном напряжении передней большеберцовой мышцы в зависимости от частоты колебаний биопотенциалов в группе с нарушенным (**NO**) и ненарушенным (**YES**) восприятием тепла для кожного рецептивного поля, иннервационно связанного со спинальным сегментом L_5 .

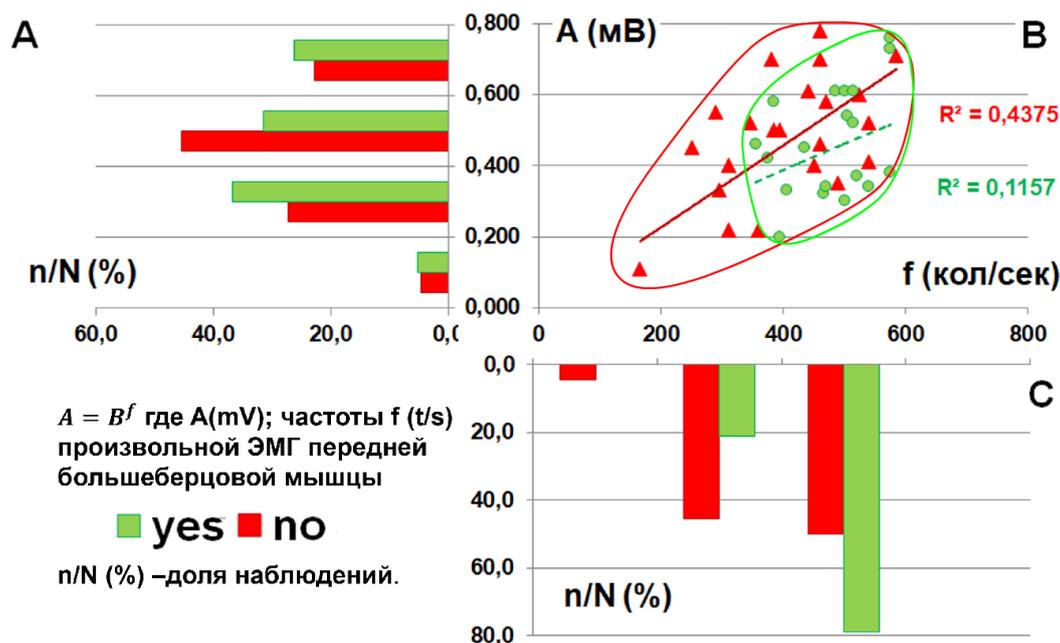


Рис. 1. Характер взаимосвязи амплитуды $A(mV)$ и частоты f (кол./сек.) произвольной ЭМГ передней большеберцовой мышцы в зависимости от наличия (**YES**) или отсутствия (**NO**) порогов ощущения тепла рецептивного поля спинального сегмента L_5 . Статистическое распределение значений (**A**) амплитуды, (**C**) – частоты колебаний ЭМГ.

N – общее количество наблюдений, n – количество наблюдений в i -том заданном диапазоне;
 n/N (%) –доля наблюдений

При этом множество точек «YES» полностью находится внутри территории, занимаемой множеством точек «NO» (рис. 1В), занимая центральную и правую часть диаграммы (области средних и высоких значений амплитудно-частотного диапазона ЭМГ). Для подгруппы NO количество наблюдений между средними и высокими частотами распределяется более равномерно, чем для подгруппы YES (рис. 1С). В последнем случае преобладает высокочастотная ЭМГ. Значения амплитуды ЭМГ (рис. 1А) для сравниваемых групп распределяются сходным образом с максимумами в области средних значений, однако на фоне нарушения восприятия тепла максимум распределения амплитуд более выражен, чем в группе YES.

Из набора аппроксимационных уравнений Excel-10 максимальный коэффициент детерминации R^2 соответствует степенной функции $A = Bf^k$; где A – амплитуда ЭМГ, B – некоторый эмпирический коэффициент связи, f – частота колебаний ЭМГ. Однако, судя по значениям R^2 , для подгруппы NO (рис. 1) он достигает лишь пограничного уровня, между плохой и приемлемой аппроксимацией. Для подгруппы YES связь между параметрами « A » и « f » практически отсутствует.

В группе пациентов с нарушением восприятия тепла после оперативной коррекции деформации позвоночника отмечается заметное смещение всей области данных в нижнюю часть диаграммы (рис. 2В), что связано с послеоперационным снижением амплитуды ЭМГ.

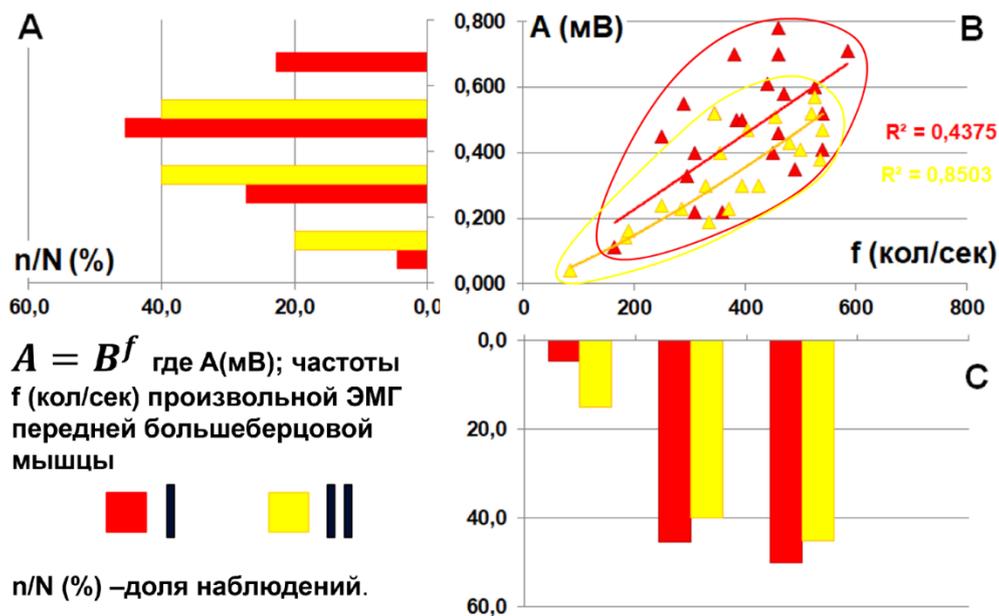


Рис. 2. Изменение характера взаимосвязи амплитуды A (мВ) и частоты f (кол./сек.) произвольной ЭМГ передней большеберцовой мышцы на фоне отсутствия (NO) порогов

ощущения тепла рецептивного поля спинального сегмента L₅ I – до и II - после оперативного вмешательства. Статистическое распределение значений (A) амплитуды, (C) частоты колебаний ЭМГ. n/N (%) - доля наблюдений

При этом характер распределения амплитуд ЭМГ становится более плавным, сглаженным по сравнению с дооперационным периодом (рис. 1А). Изменения в распределении параметра f практически отсутствуют (рис. 2С).

Максимальные значения коэффициентов детерминации по-прежнему сохраняются для степенной функции. Однако сам данный параметр значительно увеличивается и достигает уровня высокого соответствия распределения данных выбранному уравнению.

В группе пациентов с сохранением восприятия тепла после оперативной коррекции деформации позвоночника данные группируются практически в той же области диаграммы, что и до операции (рис. 3В).

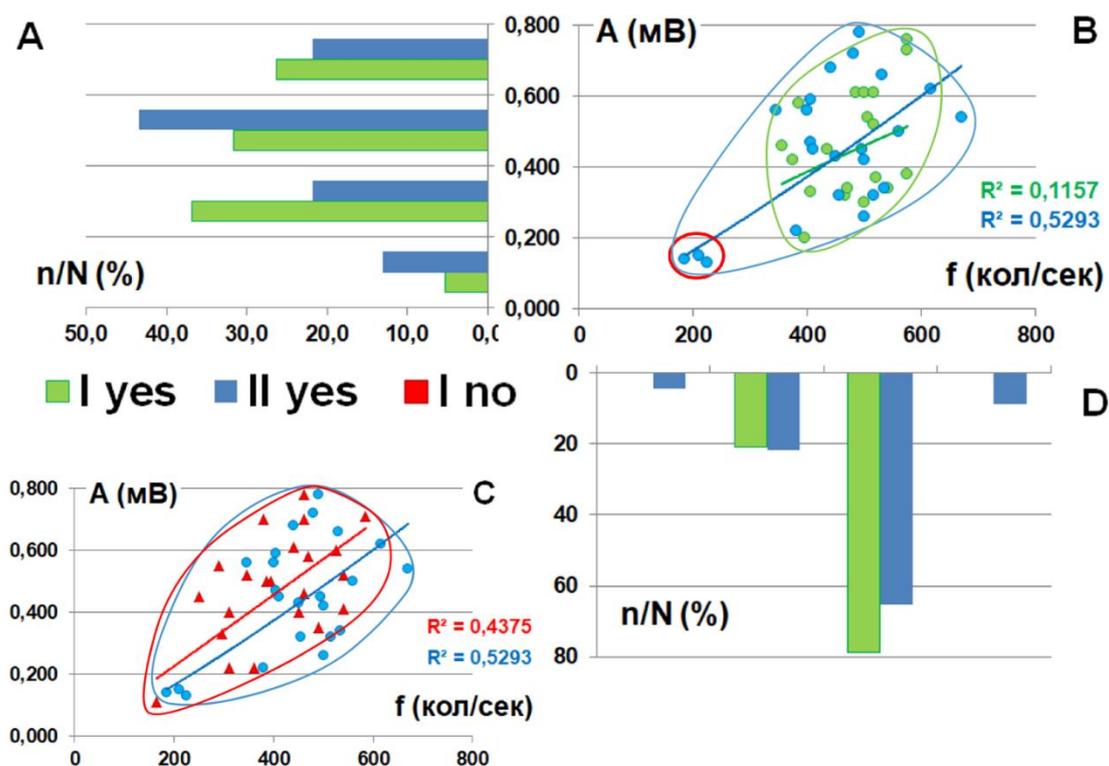


Рис. 3. Изменение характера взаимосвязи амплитуды A(мВ) и частоты f (кол./сек.) произвольной ЭМГ m.tibialis anterior на фоне сохранения (YES) порогов ощущения тепла рецептивного поля спинального сегмента L₅ I – до и II – после оперативного вмешательства. Статистическое распределение значений (A) амплитуды, (D) – частоты колебаний ЭМГ. n/N (%) - доля наблюдений. C - совпадение территорий, занимаемых группами наблюдений с сохранённым восприятием тепла в послеоперационном периоде и с нарушением восприятия тепла перед операцией в фазовом пространстве ЭМГ-параметров

Но если в дооперационном периоде значения амплитуды ЭМГ были сконцентрированы в диапазоне 400-600 мВ, то после операции они относительно равномерно распределились в диапазоне от 200 до 800 мВ (рис. 3А), т.е. пространственное распределение наблюдений стало похоже на конфигурацию, соответствующую группе NO в предоперационном периоде (рис. 3С), за исключением небольшого количества наблюдений в левом нижнем углу диаграммы. При этом максимальные значения амплитуды ЭМГ в обеих группах сконцентрированы в частотном диапазоне 400-600 колебаний в секунду (рис. 3D). Следует отметить, что в послеоперационном периоде появились единичные наблюдения низкочастотной низкоамплитудной ЭМГ (на рисунке обведено красным). Последнее является причиной повышения коэффициента детерминации от уровня случайного шума в дооперационном периоде до уровня приемлемой аппроксимации после операции.

Таким образом, в послеоперационном периоде для всего множества наблюдений имеет место высокое (для группы NO) и среднее (для группы YES) качество аппроксимации с помощью степенной функции зависимости амплитуды произвольной ЭМГ от её частоты (рис. 4В).

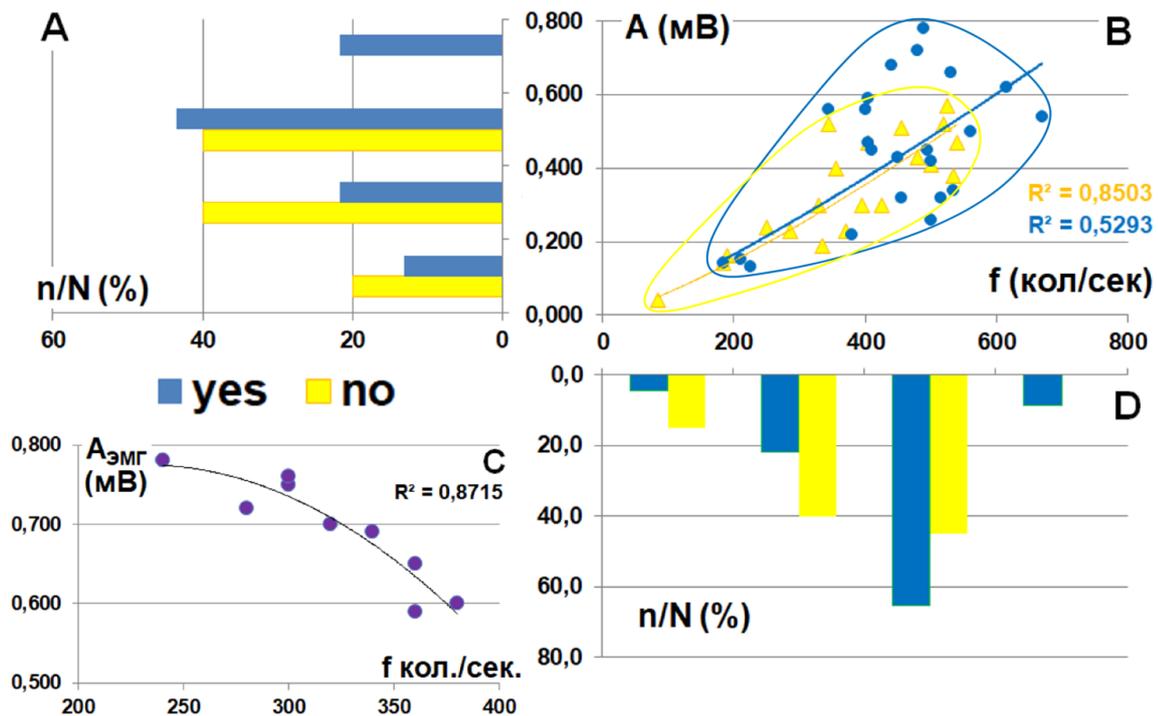


Рис. 4. Характер взаимосвязи амплитуды A (мВ) и частоты f (кол./сек.) произвольной ЭМГ передней большеберцовой мышцы в зависимости от наличия (YES) или отсутствия (NO) порогов ощущения тепла рецептивного поля спинального сегмента L_5 в послеоперационном периоде. Статистическое распределение значений (А) амплитуды, (D) – частоты колебаний ЭМГ. (С) – амплитудно-частотные паттерны ЭМГ здорового испытуемого. n/N (%) – доля наблюдений

При этом множество наблюдений в группе NO смещено относительно множества наблюдений группы YES в область низких частот и низких амплитуд.

Сочетание определённых значений амплитуды и частоты ЭМГ, регистрируемой при максимальном произвольном напряжении, детерминировано параллельной работой двух физиологических механизмов (рис. 5), обеспечивающих поддержание заданного уровня усилия.



Рис. 5. Механизмы управления степенью активации мышцы

Это увеличение частоты импульсации активных α -мотонейронов и рекрутирование дополнительных двигательных единиц. Их взаимодействие модулируется рядом факторов: типом рекрутируемых двигательных единиц [8, с. 22], включением интрасегментарных механизмов синхронизации активности двигательных единиц, сенсорным фоном, на котором происходит развитие мышечного напряжения, в особенности присутствием в нём ноцицептивного компонента [9].

Для соматически здорового человека многократное повторение теста на максимальное произвольное напряжение демонстрирует умеренную обратную зависимость амплитуды ЭМГ при максимальном произвольном напряжении от её частоты (рис. 4С). Это связано с тем, что увеличение частоты импульсации мотонейронов ведёт к учащению наложения друг на друга противоположных по знаку фаз их потенциалов действия [8, с. 96]. В целом такой характер взаимосвязи сохраняется и для ЭМГ группы здоровых испытуемых, близких по возрасту и

соматическому статусу. Но качество аппроксимации при этом заметно снижается по сравнению с данными одного человека, что видно на рисунке 1Б для группы NO, за счёт того, что двигательные единицы тестируемой мышцы при её максимальном напряжении у разных людей могут заметно различаться по занимаемой территории, электрофизиологическим свойствам и т.п. [10, с. 57], что отражается на характере суммации их потенциалов действия при регистрации ЭМГ. При высокой неоднородности группы испытуемых или под действием факторов, повышающих неоднородность, качество аппроксимации может снизиться до уровня случайного шума. Примером этому служит группа YES в предоперационном периоде (рис. 1Б). Поэтому взаимное расположение территорий, занимаемых множеством наблюдений сравниваемых групп, и соотношение их коэффициентов детерминации позволяет предположить, что нарушение восприятия тепла отражается на характере рекрутирования двигательных единиц. То есть нарушение термочувствительности маркирует некий механизм, унифицирующий их активацию.

Смещение на диаграмме множества наблюдений обеих групп (рис. 2Б, 3Б) влево вниз относительно исходного состояния (область низких амплитуд и частот) обусловлено действием центрального охранительного торможения [9], обычно наблюдаемого в послеоперационном периоде [11]. Поскольку это смещение более выражено на фоне термоанестезии (рис. 4Б), можно констатировать, что у пациентов с нарушением восприятия тепла более интенсивно спинальное торможение мышечной активности по сравнению с ситуацией сохранения восприятия тепла. Видимо, спинальное торможение α -мотонейронов в послеоперационном периоде усиливается на фоне инактивации термочувствительности. Наблюдаемое при этом усиление степени сопряжения частоты ЭМГ и её амплитуды, более выраженное на фоне нарушения восприятия тепла, можно объяснить тем, что остаточные эффекты анестезии [12-14], носящие генерализованный характер [15-17], а также отсроченные эффекты повышенной ноцицептивной активности [9] во взаимодействии друг с другом так меняют режим функционирования спинального моторного центра, что оба механизма генерации произвольной ЭМГ (рис. 5) начинают функционировать в режиме синергии. Данный феномен требует дополнительных объяснений и проведения дальнейших исследований.

Заключение

Таким образом, состояние термоанестезии усиливает тормозные влияния на спинальные двигательные центры и изменяет характер взаимосопряжённости амплитуды и частоты ЭМГ при максимальном произвольном напряжении после хирургической коррекции деформации позвоночника.

Список литературы

1. Иванова А.А., Хорев И.А., Лебедева М.Н. Предоперационное состояние вегетативной регуляции у пациентов с идиопатическим подростковым сколиозом // Хирургия позвоночника. 2022. № 19 (3). С. 14–21. DOI: 10.14531/ss2022.3.14-21.
2. Ajiboye R.M., Park H.Y., Cohen J.R., Vellios E.E., Lord E.L., Ashana A.O., BUSER Z. and WANG J.C. Demographic Trends in the Use of Intraoperative Neuromonitoring for Scoliosis Surgery in the United States // Int. J. Spine Surg. 2018. № 12 (3). P. 393-398. DOI: 10.14444/5046.
3. Holdefer R.N., Skinner S.A. 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). P. 1556–1566. DOI: 10.1016/j.clinph.2020.03.024.
4. Nagarajan L., Ghosh S., Dillon D., Palumbo L., Woodland P., Thalayasingam P., Lethbridge M. Intraoperative neurophysiology monitoring in scoliosis surgery in children // Clinical Neurophysiology Practice. 2019. P. 11–17. DOI: 10.1016/j.cnp.2018.12.002.
5. 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). С. 64-68.
6. Мейгал А.Ю., Письменный К.Н. Влияние общего согревания и охлаждения организма на постактивационный эффект в мышцах верхних конечностей // Физиология человека. 2009. № 35 (1). С. 51-57.
7. Щурова Е.Н., Рябых С.О., Кобызев А.Е., Очирова П.В. Особенности состояния температурно-болевого чувствительности у подростков с идиопатическим сколиозом III–IV степени // Физиология человека. 2016. № 42 (1). С. 100–105. DOI: 10.7868/S0131164615060089.
8. Персон Р.С. Спинальные механизмы управления мышечным сокращением. М.: Наука, 1985. 184 с.
9. Алатырев В.И., Еремеев А.М., Плещинский И.Н. Влияние длительного ноцицептивного раздражения на двигательные функции человека // Физиология человека. 1990. № 16 (3). С. 77-83.
10. Гехт Б.М., Касаткина Л.Ф., Самойлов М.И., Санадзе А.Г. Электромиография в диагностике нервно-мышечных заболеваний. Таганрог: Издательство ТРТУ, 1997. 370 с.
11. Сайфутдинов М.С., Рябых С.О. Нейрофизиологический контроль функционального состояния пирамидной системы в процессе лечения больных с деформацией позвоночника // Неврологический журнал. 2018. № 23 (5). С. 248-258.
12. Craig M.M., Misic B., Pappas I., Adapa R.M., Menon D.K. and Stamatakis E.A. Propofol sedation-induced alterations in brain connectivity reflect parvalbumin interneurone distribution in

human cerebral cortex // *British Journal of Anaesthesia*. 2021. № 126 (4). P. 835e844. DOI: 10.1016/j.bja.2020.11.035.

13. Hight D.F., Voss L.J., García P.S., Sleight J.W. Electromyographic activation reveals cortical and sub-cortical dissociation during emergence from general anesthesia // *J. Clin Monit Comput*. 2017. № 31 (4). P. 813-823. DOI: 10.1007/s10877-016-9911-z.

14. Luo C., Zhang Y.L., Luo W., Zhou F.H, Li C.Q., Xu J.M., Dai R.P. Differential effects of general anesthetics on anxiety-like behavior in formalin-induced pain: involvement of ERK activation in the anterior cingulate cortex // *Psychopharmacology (Berl)*. 2015. № 232 (24). P. 4433-44. DOI: 10.1007/s00213-015-4071-2.

15. Stewart J.A., Särkelä M.O.K., Wennervirta J., Vakkuri A.P. Novel insights on association and reactivity of Bispectral Index, frontal electromyogram, and autonomic responses in nociception-sedation monitoring of critical care patients // *BMC Anesthesiol*. 2022. 15. № 22 (1). P. 353. DOI: 10.1186/s12871-022-01864-6.

16. Voss L.J., Andersson L., Jadelind A. The general anesthetic propofol induces ictal-like seizure activity in hippocampal mouse brain slices // *Springerplus*. 2015. № 24. DOI: 10.1186/s40064-015-1623-1.

17. Zamariola G., Maurage P., Luminet O., Corneille O. Interoceptive accuracy scores from the heartbeat counting task are problematic: Evidence from simple bivariate correlations // *Biol. Psychol*. 2018. № 137. P. 12-17. DOI: 10.1016/j.biopsycho.2018.06.006.