

Журнал медико-биологических исследований. 2025. Т. 13, № 4. С. 453–464.
Journal of Medical and Biological Research, 2025, vol. 13, no. 4, pp. 453–464.



Научная статья
УДК 612.766+611.81
DOI: 10.37482/2687-1491-Z261

Влияние практики релаксации на синхронизацию нейронов коры головного мозга человека при развитии утомления во время локальной работы мышц

Юрий Игоревич Корюкалов* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4897-2613>
Татьяна Владимировна Попова* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5060-8132>
Ольга Германовна Коурова* ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2337-3531>

*Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
(Челябинск, Россия)

Аннотация. Многочисленные публикации о неблагоприятном влиянии длительной локальной работы мышц на двигательный аппарат и кровообращение свидетельствуют о риске серьезных проблем со здоровьем у лиц, занятых локальным физическим трудом на производстве. Одной из причин низкой эффективности принимаемых в настоящее время профилактических мер является отсутствие конкретных научных данных о центральных механизмах утомительной локальной работы мышц. Цель работы – выявить изменения электроэнцефалографических показателей нейронов коры головного мозга, синхронизирующихся при локальной работе и во время утомления, у здоровых мужчин 21–29 лет с учетом их физической и ментальной тренированности. **Материалы и методы.** Исследование проводилось на базе лаборатории Спортивной науки и лаборатории Психофизической безопасности научно-исследовательского центра Южно-Уральского государственного университета в период с 2023 по 2024 год. В исследовании участвовали практически здоровые мужчины в возрасте от 21 до 29 лет (средний возраст – 24±3 года). Обследуемые были разделены на три группы: спортсмены, занимающиеся ациклическими видами спорта с использованием локальных нагрузок (кикбоксинг, бокс) ($n = 16$); студенты и аспиранты, регулярно занимающиеся релаксацией ($n = 23$); студенты и аспиранты, не занимающиеся ни спортом, ни релаксационными техниками (контроль; $n = 21$). В группе лиц, занимающихся релаксацией, сначала проводилось обучение с опытным инструктором, а в дальнейшем испытуемые выполняли упражнения самостоятельно при прослушивании аудиозаписей. Изучались процессы синхронизации альфа-ритма на электроэнцефалограммах (ЭЭГ) при утомительной локальной нагрузке на кистевом эргографе. Все измерения проводились в межсессионный и межсоревновательный периоды. **Результаты.** Выявлены изменения показателей ЭЭГ, которые свидетельствуют об ослаблении процессов син-

© Корюкалов Ю.И., Попова Т.В., Коурова О.Г., 2025

Ответственный за переписку: Татьяна Владимировна Попова, адрес: 454080, г. Челябинск, просп. Ленина, д. 76; e-mail: tvopopova@susu.ru

хронизации и повышении уровня функционального напряжения у всех испытуемых при локальной нагрузке, особенно выраженные изменения отмечены в контрольной группе. Несмотря на то, что у спортсменов после локальной нагрузки восстановление показателей синхронизации происходило быстрее, чем у контрольной группы, релаксация также нормализовывала показатели синхронизации на ЭЭГ и приводила к повышению работоспособности при длительной локальной работе мышц. Таким образом, релаксация является эффективным и более доступным по временным и финансовым затратам, по сравнению со спортом, способом воздействия на функциональное состояние центральной нервной системы, что позволяет рекомендовать ее как профилактическое средство развития профессиональных заболеваний у лиц, чей труд связан с локальными мышечными нагрузками.

Ключевые слова: синхронизация альфа-ритма, релаксация, локальная мышечная деятельность, функциональное напряжение, профилактика профессиональных заболеваний, коррекция функционального состояния, утомление при мышечной работе

Для цитирования: Корюкалов, Ю. И. Влияние практики релаксации на синхронизацию нейронов коры головного мозга человека при развитии утомления во время локальной работы мышц / Ю. И. Корюкалов, Т. В. Попова, О. Г. Коурова // Журнал медико-биологических исследований. – 2025. – Т. 13, № 4. – С. 453-464. – DOI 10.37482/2687-1491-Z261.

Original article

Effect of Relaxation Practice on Neuronal Synchronization in the Human Cerebral Cortex During the Development of Fatigue at Local Muscle Work

Yury I. Koryukalov* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4897-2613>

Tatiana V. Popova* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5060-8132>

Olga G. Kourova* ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2337-3531>

*South Ural State University (National Research University)
(Chelyabinsk, Russia)

Abstract. Numerous publications about the adverse effects of prolonged local muscle work on the musculoskeletal system and blood circulation point out a risk of serious health problems in individuals whose work involves local muscle load. One of the reasons behind the low efficiency of the current preventive measures is the lack of concrete scientific data on the central mechanisms of fatiguing local muscle work. The **purpose** of the study was to investigate changes in the electroencephalographic parameters during neuronal synchronization at prolonged local muscle work and fatigue in healthy men aged between 21 and 29 years, taking into account their physical and mental fitness. **Materials and methods.** The research was conducted at the Sport Science Laboratory and Psychophysical Safety Laboratory, Research Centre, South Ural State University, in 2023–2024. The study involved apparently healthy men aged 21 to 29 years (mean age 24 ± 3 years). The subjects were divided into three groups: athletes doing acyclic sports using local loads (kickboxing and boxing) ($n = 16$), students and postgraduate students regularly doing relaxation practice ($n = 23$) and students and postgraduates doing neither sports nor

Corresponding author: Tatiana Popova, address: prosp. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080, Russia;
e-mail: tvpopova@susu.ru

relaxation exercises (control; $n = 21$). The relaxation group initially received training from an experienced instructor and continued to practice the techniques independently while listening to audio recordings. EEG alpha synchronization was studied during fatiguing local loads using a hand ergograph. All measurements were performed during intersession and between competitions. **Results.** Changes in EEG parameters were identified, indicating a weakening of synchronization processes and an increase in the level of functional stress in all subjects during local load; especially pronounced changes were observed in the control group. Although the athletes recovered from the local load faster than the controls, relaxation was also found to normalize EEG synchronization parameters and lead to increased performance during prolonged local muscle work. Thus, relaxation is an effective as well as more affordable and less time-consuming, compared to sports, way of influencing the functional state of the central nervous system and can be recommended as a preventive measure against the development of occupational diseases in people whose work involves local muscle load.

Keywords: *alpha synchronization, relaxation, local muscle activity, functional stress, occupational disease prevention, functional state correction, fatigue due to muscle work*

For citation: Koryukalov Yu.I., Popova T.V., Kourova O.G. Effect of Relaxation Practice on Neuronal Synchronization in the Human Cerebral Cortex During the Development of Fatigue at Local Muscle Work. *Journal of Medical and Biological Research*, 2025, vol. 13, no. 4, pp. 453–464. DOI: 10.37482/2687-1491-Z261

Профилактика нарушений здоровья в современных условиях трудовой деятельности должна основываться не только на определении степени вредности и опасности условий труда, его тяжести и напряженности, но и на выявлении профессиональных рисков, возможности возникновения профессиональных заболеваний [1]. Такие заболевания сопряжены со значительными затратами на лечение, невыходами на работу и инвалидизацией, что определяет актуальность их изучения в связи с неблагоприятными производственными факторами для разработки профилактических мероприятий [2, 3].

В зависимости от величины мышечной массы, необходимой для выполнения той или иной работы, физическую нагрузку человека принято подразделять на три вида: локальная, региональная и общая (глобальная). В научной литературе приводятся детальные характеристики общих нагрузок: критерии тяжести, напряженности, интенсивности труда [4–6]. Менее исследованные, но более распространенные локальные нагрузки, в т. ч. ручной труд, зачастую сопровождаются напряжением зрительного анализатора, психоэмоциональным напряжением. Известно, что чем меньше мышц занято в работе, тем быстрее развивается утомление, а оно приводит к выраженным

функциональным изменениям в организме [7]. В физиологии известны факты неблагоприятного влияния длительных локальных нагрузок, особенно в изометрическом режиме, на опорно-двигательный аппарат и сердечно-сосудистую систему, в т. ч. на развитие гипертензивных состояний [8, 9]. Эти факты объясняются действием центральных механизмов. Показано, что интенсивность аутогенного торможения спинальных альфа-мотонейронов понижается при увеличении силы изометрического сокращения мышц и возрастает при длительном выполнении значительного по величине изометрического напряжения с развитием утомления. Установлена также зависимость процесса аутогенного торможения альфа-мотонейронов спинного мозга от эфферентных сигналов из головного мозга и мощности афферентных сигналов от сухожильных рецепторов [10, 11].

В предыдущем исследовании мы также показали [12], что гипертензивная реакция сердечно-сосудистой системы на локальную работу мышц у операторов токарных станков связана с функциональным напряжением центральной нервной системы, а релаксация снижает его и способствует восстановлению функционального состояния сердца и сосудов.

Однако физиологические основы центральных механизмов адаптационных реакций на локальные нагрузки до сих пор исследованы лишь частично. В то же время существует необходимость разработки средств профилактики неблагоприятных физиологических изменений, связанных с регулярными локальными нагрузками на производстве. В этом отношении представляет интерес недостаточно изученный процесс синхронизации биотоков нейронов, в т. ч. обеспечивающих локальную мышечную деятельность. Обзор научных трудов показал, что не существует единой формулировки понятия «синхронизация», и это подтверждает необходимость дальнейшего исследования данных процессов. Так, работы [13, 14] продемонстрировали, что синхронизация биоэлектрических процессов возможна на основе формирования как линейных (когерентность), так и нелинейных (совместная фрактальная размерность) связей между пространственно разделенными нейронными сетями, вовлеченными в выполнение задания.

Для научного обоснования системы профилактики профессиональных заболеваний при длительной локальной работе мышц необходимы как детальные исследования центральных механизмов самой локальной работы, так и поиск средств коррекционного воздействия на эти механизмы.

Цель исследования – выявить изменения электроэнцефалографических показателей нейронов коры головного мозга, синхронизирующихся при локальной работе и во время утомления, у здоровых мужчин 21–29 лет с учетом их физической и ментальной тренированности.

Материалы и методы. Исследование проводилось на базе лаборатории Спортивной науки и лаборатории Психофизической безопасности научно-исследовательского центра Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) в период с 2023 по 2024 год. Дизайн эксперимента соответствовал требованиям Хельсинкской декларации (редакция 2013 года) и был одобрен этическим комитетом ЮУрГУ (протокол № 7 от 20.10.2023). Соблюдалась кон-

фиденциальность сведений об участниках. От всех обследуемых получено информированное согласие. Гипотеза исследования заключалась в предположении о благотворном влиянии занятий спортом и релаксацией на восстановительные процессы после локальной мышечной нагрузки и повышении выносливости у данных лиц.

В эксперименте участвовали практически здоровые мужчины в возрасте от 21 до 29 лет (средний возраст – 24 ± 3 года), проживавшие в нормальных условиях. Они были разделены на три группы. Первую составили спортсмены высокой квалификации (кандидаты в мастера спорта и мастера спорта), занимающиеся ациклическими видами спорта (кикбоксинг, бокс) с использованием локальных нагрузок ($n = 16$). Вторую – студенты и аспиранты ЮУрГУ, регулярно занимающиеся релаксационными упражнениями ($n = 23$). В данной группе сначала проводилось обучение с опытным инструктором, а в дальнейшем обследуемые выполняли упражнения самостоятельно при прослушивании аудиозаписей. Они располагались в удобных креслах, с закрытыми глазами и концентрировали внимание на определенных точках в организме или пространстве. При усвоении курса занятий испытуемые получали навыки расслабления мышц, достижения состояния покоя, тепла, комфорта, концентрации внимания, изменения дыхания. С помощью прибора «Миотон» (Mioton, Эстония) подтверждался сам факт расслабления. Занятия проводились на протяжении полугода ежедневно в лабораторных или домашних условиях в течение 5–7 мин в сутки. В день записи электроэнцефалограммы (ЭЭГ) занятия релаксацией не проводились. Третья группа являлась контрольной. В нее вошли студенты и аспиранты, не занимающиеся ни спортом, ни релаксационными техниками ($n = 21$). Данные группы были выделены для исследования влияния физической (спорт) и ментальной (практика релаксации) тренированности на процессы синхронизации нейронов коры и их действия на работу центральной нервной системы при локальной нагрузке до утомления. Все испытуемые находились примерно

в аналогичных условиях жизнедеятельности: спортсмены – в подготовительном периоде, занимающиеся релаксацией и нетренированные – в межсессионном периоде.

При помощи электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр» (ООО «Нейрософт», Россия) осуществлялась регистрация ЭЭГ с 16 чашечных электродов, расположенных в основных отведениях (Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8, C3, C4, T3, T4, T5, T6, P3, P4, O1, O2), с настройками чувствительности 70 мкВ/мм и скоростью развертки 30 мм/с, на мочках ушей закреплялись индифферентные электроды A1 и A2. Регистрация ЭЭГ производилась в состоянии покоя с открытыми глазами (фон, 10 мин) и при функциональных пробах (локальная нагрузка до 3 мин и восстановительный период 5 мин). Запись была автоматически просканирована на наличие артефактов, которые устранились с помощью регрессионной процедуры, применяемой в комплексе с методом независимых компонент [15], а также при визуальном выборе эпох для анализа. Помимо основных показателей альфа-ритма, в выявленных нами паттернах синхронизации [16] дополнительно анализировались показатели периодичности паттернов, тип паттерна синхронизации, а также показатели альфа-ритма в самих паттернах.

Для локальной нагрузочной пробы со статическим напряжением использовался кистевой динамометр ДК-50 («МедТехника», Россия). Для моделирования локальных изометрических напряжений испытуемые сжимали кистью динамометр с усилием в 1/3 от максимального и удерживали усилие на данном уровне до появления утомления, что, как показали наши ранние исследования [16], обеспечивало адекватную нагрузку. В литературе она используется как показатель статической выносливости кисти.

Для компьютерного анализа производился отбор эпох по 2,5 с, что позволило избежать влияния глазных и мышечных артефактов на спектральные показатели альфа-ритма (7,5–13 Гц) ЭЭГ, в основном в отведениях C3–C4. Компьютерный анализ ЭЭГ включал периодометрический и спектральный анализ, проводившийся с помо-

щью быстрого преобразования Фурье. Полученные данные обрабатывались с использованием программ Statistica 6.0 и SPSS. Рассчитывались среднее арифметическое (M) упорядоченной выборки, стандартная ошибка среднего (m) и t -распределение Стьюдента. Предварительная проверка нормальности распределения производилась при помощи критерия Колмогорова–Смирнова. Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез для всех переменных принимался равным 0,05.

Результаты. Спектральный анализ альфа-активности испытуемых показал, что на протяжении всей ЭЭГ можно выделить эпохи, в которых отмечается синхронизация на одной доминирующей частоте альфа-ритма в 50–100 % отведений. В определенных наборах отведений (8–10 отведений) при этом периодически появлялся рисунок ЭЭГ, т. е. паттерн синхронизации, который носил индивидуальный характер для конкретного испытуемого.

Анализировались как традиционно используемые критерии паттернов: индекс ритма, частота, амплитуда, мощность, межполушарная асимметрия, так и дополнительно предложенные нами показатели их периодичности, например продолжительность интервала между паттернами, которая составляла в среднем от 20 до 40 с. В состоянии покоя (фоновая регистрация ЭЭГ) у испытуемых контрольной группы выявлены наиболее низкие значения основных показателей синхронизации (см. таблицу, с. 458) по сравнению со спортсменами и лицами, практикующими релаксацию.

Общими закономерностями ЭЭГ-изменений при развитии утомления в процессе выполнения пробы с локальной нагрузкой явились увеличение интервалов между паттернами синхронизации, снижение доминирующей частоты альфа-ритма и повышение амплитуды, что свидетельствует об ослаблении процессов синхронизации. Более низкие показатели межполушарной асимметрии по мощности альфа-ритма при нагрузке по сравнению с группой контроля отмечались у спортсменов, что, вероятно, связано с характером их тренировочной нагрузки.

**Изменение показателей альфа-ритма ЭЭГ
(по отведениям C3–C4) у практически здоровых
мужчин в пробе с локальной нагрузкой, $M \pm m$**

**Changes in EEG alpha parameters (leads C3–C4)
in apparently healthy men in a local load test, $M \pm m$**

Группа	Фон	Нагрузка	Восстановление
<i>Доминирующая частота, Гц</i>			
Контроль	9,9 \pm 0,5	8,3 \pm 0,4*	9,6 \pm 0,4**
Спорт	9,8 \pm 0,4	8,6 \pm 0,4*	10,2 \pm 0,2**
Релаксация	10,0 \pm 0,6	8,5 \pm 0,3*	9,6 \pm 0,4**
<i>Амплитуда, мкВ</i>			
Контроль	12,2 \pm 3,1	21,1 \pm 3,8*	16,2 \pm 2,8
Спорт	19,3 \pm 3,4 [^]	31,3 \pm 4,3* [^]	23,3 \pm 3,9 [^]
Релаксация	21,4 \pm 4,6 [^]	26,4 \pm 3,6	19,1 \pm 4,1
<i>Индекс ритма, %</i>			
Контроль	14,7 \pm 2,9	19,3 \pm 3,2	18,2 \pm 2,8
Спорт	25,6 \pm 4,5 [^]	31,4 \pm 4,3 [^]	34,4 \pm 3,4* [^]
Релаксация	30,4 \pm 3,6 [^]	21,2 \pm 3,6*	24,2 \pm 3,2
<i>Межполушарная асимметрия, %</i>			
Контроль	17,2 \pm 1,9	28,2 \pm 3,1*	21,3 \pm 2,6**
Спорт	14,6 \pm 2,4	24,8 \pm 2,6*	14,1 \pm 1,7** [^]
Релаксация	13,1 \pm 2,3 [^]	25,5 \pm 2,4*	14,6 \pm 2,3** [^]
<i>Длительность интервалов между паттернами, с</i>			
Контроль	22,4 \pm 3,8	18,6 \pm 2,6	16,4 \pm 3,9*
Спорт	13,1 \pm 2,6 [^]	14,3 \pm 3,4	9,2 \pm 2,2* [^]
Релаксация	12,3 \pm 2,9 [^]	15,4 \pm 2,8	14,1 \pm 3,4

Примечание. Установлены статистически значимые различия ($p < 0,05$): * – с фоновой регистрацией; ** – с локальной нагрузкой; [^] – с контрольной группой.

При нагрузке у спортсменов и лиц, практикующих релаксацию, в паттернах синхронизации на ЭЭГ (см. таблицу) также наблюдалось снижение доминирующей частоты альфа-ритма (с 9,8 до 8,6 Гц и с 10,0 до 8,5 Гц соответственно) с последующим восстановлением после нагрузки. Высокие значения индекса альфа-ритма выявлялись в префронтально-центральных отведениях ЭЭГ.

У всех испытуемых во время локальной работы зафиксировано также усиление тета-активности (рис. 1а, 2а). При этом наблюдались этапы

перехода из частотного диапазона альфа-ритма в тета-диапазон и обратно с ростом мощности тета-ритма, совпадавшим с первыми субъективными признаками утомления, которые у спортсменов появлялись позже, чем у испытуемых других групп. У контрольной группы первые признаки утомления наблюдались раньше, чем у спортсменов и практикующих релаксацию.

При локальной нагрузке во время развития утомления у спортсменов и лиц, практикующих релаксацию, отмечалась выраженная активность лобно-центральных отделов коры головного мозга с синхронизацией альфа-ритма. Характерно, что время выполнения пробы с локальной нагрузкой до утомления у спортсменов в среднем было больше (123,0 \pm 5,1 с), чем у лиц, практикующих релаксацию (109,0 \pm 6,8 с), и контрольной группы (106,0 \pm 6,2 с).

В период восстановления после локальной нагрузки у большинства испытуемых всех групп отмечалось усиление периодичности синхронизации (уменьшение интервалов между паттернами). При этом наблюдалось увеличение доминирующей частоты альфа-ритма, на которой формировались паттерны синхронизации, до 10,0 \pm 0,4 Гц. Наименьшие значения интервалов между паттернами с первой минуты восстановительного периода отмечены у спортсменов (см. таблицу), т. е. периодичность синхронизации у них повышалась. В группе практикующих релаксацию значения интервалов также уменьшались, но неравномерно, чередуясь с периодами повышения. Таким образом, при восстановлении после выполнения локальной мышечной работы, судя по уменьшению интервалов, периодичность паттернов у большинства испытуемых увеличивалась. Наибольшая скорость восстановления периодичности паттернов до исходной отмечена у спортсменов и лиц, практикующих релаксацию.

В восстановительный период (рис. 1б, 2б) у большинства спортсменов и практикующих релаксацию наблюдалось снижение мощности тета-ритма и увеличение мощности альфа-ритма. При этом был отмечен переход доминирующей медленной активности с тета- на альфа-диапазон. Во всех группах пик мощности

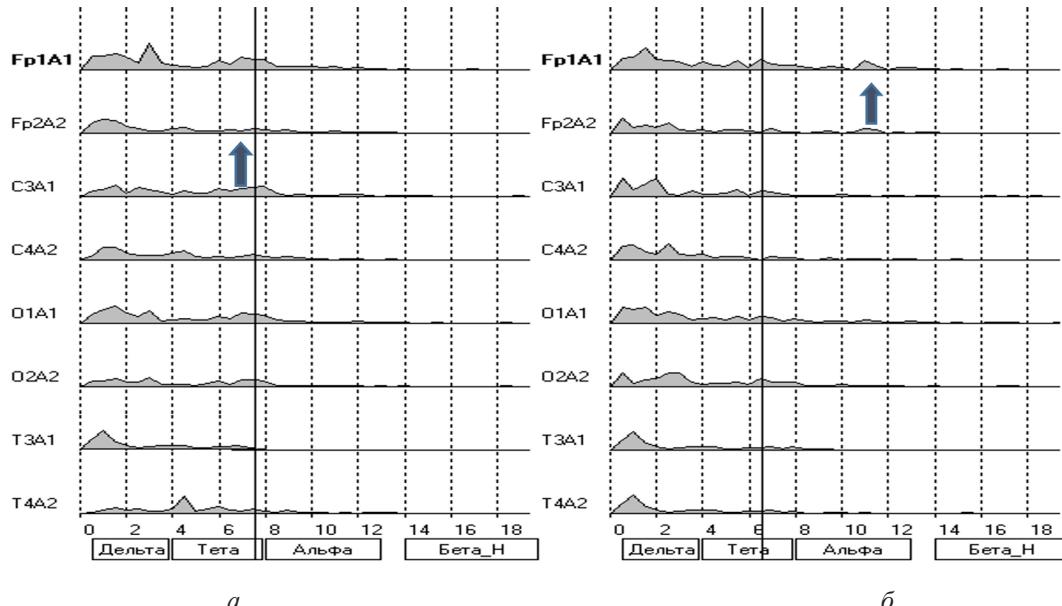


Рис. 1. Пример увеличения мощности низкочастотного альфа- и тета-ритмов при локальной нагрузке (а) и роста мощности высокочастотного альфа-ритма восстановительный период (б) у спортсменов. Масштаб мощности спектра М:2. Стрелками отмечены пик мощности тета-ритма (6,4–6,6 Гц) и пик мощности высокочастотного альфа-ритма (10,8–11,0 Гц)

Fig. 1. Example of an increase in the power of low-frequency alpha and theta rhythms under local load (a) and an increase in the power of high-frequency alpha rhythm during the recovery period (б) in athletes. Spectrum power scale M:2. Arrows indicate peak power of the theta rhythm (6.4–6.6 Hz) and peak power of the high-frequency alpha rhythm (10.8–11.0 Hz)

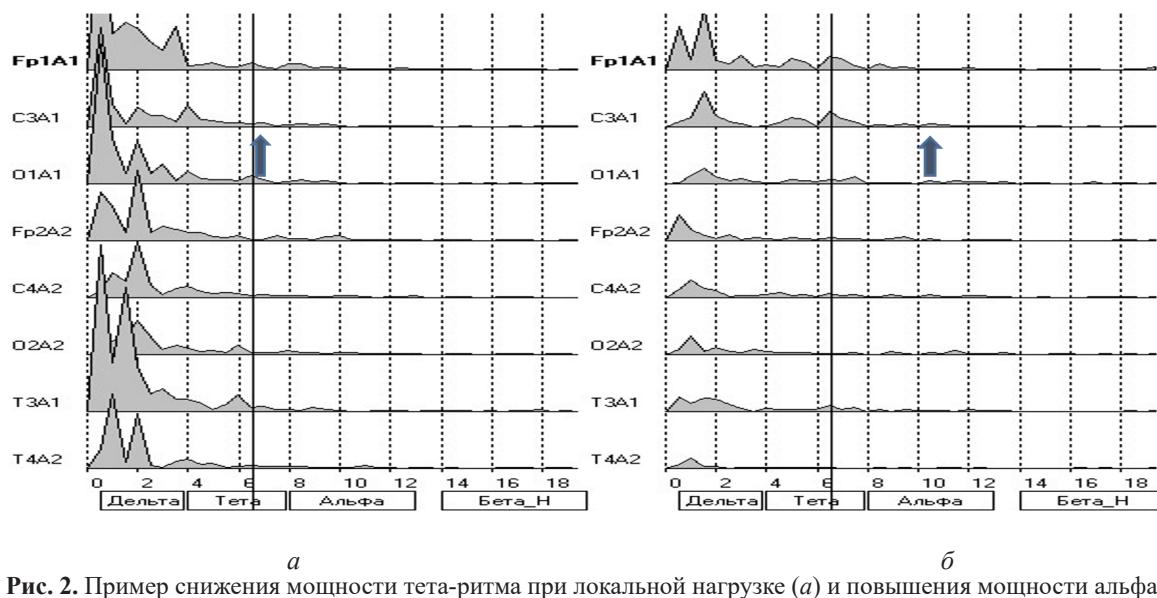


Рис. 2. Пример снижения мощности тета-ритма при локальной нагрузке (а) и повышения мощности альфа-ритма в восстановительный период (б) у лиц, практикующих релаксацию. Масштаб мощности спектра М:2

Fig. 2. Example of a decrease in theta rhythm power under local load (a) and an increase in alpha rhythm power during the recovery period (б) in individuals practicing relaxation. Spectrum power scale M:2

приходился на среднечастотный альфа-ритм (9,5–10,5 Гц). У спортсменов отмечалось два пика альфа-ритма в восстановительный период – $8,4 \pm 0,2$ и $10,5 \pm 0,3$ Гц.

У спортсменов при восстановлении после нагрузки чаще, чем у нетренированных испытуемых, наблюдалось повышение индекса альфа-ритма с преобладанием альфа-активности в передних отделах обоих полушарий, в отличие от лиц, практикующих релаксацию, у которых она доминировала в центральных отделах.

Таким образом, при локальной нагрузке у спортсменов и практикующих релаксацию отмечались рост мощности тета- и альфа-ритма, увеличение интервалов между паттернами и уменьшение доминирующей частоты альфа-ритма. В восстановительный период у спортсменов и практикующих релаксацию наблюдалось увеличение индекса альфа-ритма и его доминирующей частоты, уменьшение интервалов между паттернами, что обеспечивало более быстрое восстановление исходных показателей, в отличие от контрольной группы. Такие изменения процессов синхронизации сопровождались увеличением показателя продолжительности работы до утомления, т. е. высокой эффективностью работы.

Обсуждение. Результаты нашего исследования выявили различия в показателях синхронизации при локальной мышечной нагрузке у испытуемых всех групп. Состояние усталости у спортсменов и людей, занимающихся релаксацией, наступало позже, чем у группы контроля, общее время выполнения пробы было наибольшим у спортсменов, а наименьшим у группы контроля. Эти факты свидетельствуют о возможности адаптации к длительной локальной деятельности.

Наши данные подтверждают, что при развитии утомления во время локальной мышечной деятельности превалируют центральные механизмы регуляции [17]. Так, в предыдущей работе [12] мы получили факты достоверного роста индекса напряжения регуляции сердечно-гого ритма по Р.М. Баевскому [18] у испытуемых

разного возраста при локальной нагрузке. При этом был отмечен выраженный рост артериального давления, особенно диастолического. Эти факты также говорят о том, что утомительные локальные нагрузки вызывают повышение функционального напряжения, а их длительное воздействие может приводить к нарушениям психофизического состояния организма.

Полученные нами данные также свидетельствуют, что синхронизация биотоков нейронов является одним из основных рабочих механизмов регуляции функциональных состояний. Наши исследования подтвердили, что информативными диагностическими критериями паттернов синхронизации являются: доминирующая частота альфа-ритма, мощность, индекс альфа-ритма, а также показатели периодичности паттернов, межполушарной асимметрии, характера веретен. Так, при локальной нагрузке низкая периодичность, снижение доминирующей частоты альфа-ритма, увеличение межполушарной асимметрии, появление тета-ритма на ЭЭГ и высокая скорость развития утомления свидетельствуют об ослаблении процессов синхронизации. В совокупности данные изменения являются признаками высокой степени функционального напряжения в центральной нервной системе [19].

Наши данные показывают, что функциональное напряжение связано с нарушением процессов синхронизации между удаленными участками коры (лобно-центральными и лобно-затылочными) головного мозга. Авторы, исследующие влияние длительных локальных нагрузок на организм, отмечают, что они являются причиной развития нарушений в опорно-двигательном аппарате и сердечно-сосудистой системе, что обусловлено центральными механизмами [8, 20–22] и, по-видимому, нарушением процессов синхронизации. Используемые в настоящее время средства профилактики этих заболеваний, такие как гимнастика, улучшение эргономических условий на производстве, рационализация режимов труда и отдыха, пока не приводят к полному решению данной проблемы.

Результаты нашего исследования показали, что функциональное напряжение, возникающее при локальной мышечной деятельности, связано с нарушением процессов синхронизации в центральной нервной системе. Эффективным средством коррекции могут стать релаксационные упражнения, способствующие восстановлению параметров синхронизации. По данным [23, 24], релаксационные средства приводят к повышению работоспособности и улучшению функционального состояния центральной нервной и сердечно-сосудистой систем [25], что позволяет рекомендовать их для

профилактики развития профессиональных заболеваний.

Существует необходимость дальнейшего детального изучения механизмов воздействия релаксации на процессы синхронизации и функциональное состояние организма [26]. Также, вероятно, стоит уделить внимание исследованию механизмов комбинированного влияния физических и релаксационных упражнений на процессы синхронизации при коррекции функционального состояния как практически здоровых людей, так и лиц с функциональными нарушениями центральной нервной системы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список литературы

1. Латышевская Н.И., Алборова М.А., Давыденко Л.А., Филатов Б.Н. Условия труда и распространенность скелетно-мышечных болей у станочников по металлообработке // Медицина труда и пром. экология. 2022. Т. 61, № 1. С. 53–58. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-1-53-58>
2. Подчуфарова Е.В. Боль в пояснице: организация лечения пациентов в Великобритании // Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2014. Т. 6, № 2. С. 75–80. <https://doi.org/10.14412/2074-2711-2014-2-75-80>
3. Черникова Е.Ф., Трошин В.В., Некрасова М.М., Зуев А.В. Профессиональная обусловленность формирования болезней костно-мышечной системы у инспекторов ГИБДД // Медицина труда и пром. экология. 2019. Т. 1, № 10. С. 899–904. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-10-899-904>
4. Шерстюк С.А., Асеева А.Ю., Шерстюк М.А. Новые аспекты оценки адаптации к физическим нагрузкам: физиологически спортивное сердце и трансмитральный кровоток в условиях аэробно-анаэробного метаболизма мышечной деятельности // Междунар. науч.-исслед. журн. 2020. № 8-2(98). С. 80–86. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.048>
5. Alhumaid W., Small S.D., Kirkham A.A., Becher H., Pituskin E., Prado C.M., Thompson R.B., Haykowsky M.J., Paterson D.I. A Contemporary Review of the Effects of Exercise Training on Cardiac Structure and Function and Cardiovascular Risk Profile: Insights from Imaging // Front. Cardiovasc. Med. 2022. Vol. 9. Art. № 753652. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.753652>
6. Montero D., Roche E., Martinez-Rodriguez A. The Impact of Aerobic Exercise Training on Arterial Stiffness in Pre- and Hypertensive Subjects: A Systematic Review and Meta-Analysis // Int. J. Cardiol. 2014. Vol. 173, № 3. P. 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2014.03.072>
7. Brouwer N.P., Kingma I., van Dijk W., van Dieën J.H. Can Intermittent Changes in Trunk Extensor Muscle Length Delay Muscle Fatigue Development? // J. Biomech. 2024. Vol. 162. Art. № 111881. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111881>
8. Choi H.-M., Stebbins C.L., Lee O.-T., Nho H., Lee J.-H., Chun J.-M., Kim K.-A., Kim J.-K. Augmentation of the Exercise Pressor Reflex in Prehypertension: Roles of the Muscle Metaboreflex and Mechanoreflex // Appl. Physiol. Nutr. Metab. 2013. Vol. 38, № 2. P. 209–215. <https://doi.org/10.1139/apnm-2012-0143>
9. Bosch T., de Looze M.P., van Dieën J.H. Development of Fatigue and Discomfort in the Upper Trapezius Muscle During Light Manual Work // Ergonomics. 2007. Vol. 50, № 2. P. 161–177. <https://doi.org/10.1080/00140130600900282>
10. Rivera-Oliver M., Moreno E., Álvarez-Bagnarol Y., Ayala-Santiago C., Cruz-Reyes N., Molina-Castro G.C., Clemens S., Canela E.I., Ferré S., Casadó V., Díaz-Ríos M. Adenosine A₁-Dopamine D₁ Receptor Heteromers Control

the Excitability of the Spinal Motoneuron // Mol. Neurobiol. 2019. Vol. 56, № 2. P. 797–811. <https://doi.org/10.1007/s12035-018-1120-y>

11. Челноков А.А., Роцина Л.В., Гладченко Д.А., Пивоварова Е.А., Пискунов И.В., Городничев Р.М. Эффект чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на функциональную активность спинального торможения в системе мышц-синаергистов голени у человека // Физиология человека. 2022. Т. 48, № 2. С. 14–27. <https://doi.org/10.31857/S0131164622020035>

12. Kourova O.G., Popova T.V., Koryukalov Y.I. Body Response to Local Muscular Performance of Individuals Engaged in Various Professional Occupations // Occup. Dis. Environ. Med. 2014. Vol. 2, № 3. P. 71–75. <https://doi.org/10.4236/odem.2014.23008>

13. Ливанов М.Н., Хризман Т.П. Пространственно-временная организация биопотенциалов мозга у человека // Естественнонаучные основы психологии. М.: сб. ст. / под ред. А.А. Смирнова и др. Педагогика, 1978. С. 206–233.

14. Li H., Yao R., Xia X., Yin G., Deng H., Yang P. Adjustment of Synchronization Stability of Dynamic Brain-Networks Based on Feature Fusion // Front. Hum. Neurosci. 2019. Vol. 13. Art. № 98. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00098>

15. Mannan M.M.N., Jeong M.Y., Kamran M.A. Hybrid ICA – Regression: Automatic Identification and Removal of Ocular Artifacts from Electroencephalographic Signals // Front. Hum. Neurosci. 2016. Vol. 10. Art. № 193. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00193>

16. Popova T., Koryukalov Yu., Erlikh V., Kourova O. Neurophysiological Analysis of Adaptation Processes Rhythmicity in Athletes and Subjects Who Practice Relaxation: Experimental Study // Med. Sport. 2020. Vol. 73, № 4. P. 610–625. <https://doi.org/10.23736/S0025-7826.20.03414-6>

17. Попова Т.В., Корюкалов Ю.И., Марокко Д.А. Центральные механизмы утомления при локальной мышечной деятельности статического характера // Физиология человека. 2007. Т. 33, № 4. С. 95–100. <https://doi.org/10.1134/S0362119707040135>

18. Баранов В.М., Баевский Р.М., Берсенева А.П., Михайлов В.М. Оценка адаптационных возможностей организма и задачи повышения эффективности здравоохранения // Экология человека. 2004. № 6. С. 25–29.

19. Дик О.Е., Святогор И.А., Резникова Т.Н., Федоряка Д.А., Ноздрачев А.Д. Анализ паттернов ЭЭГ у лиц с паническими атаками // Физиология человека. 2020. Т. 46, № 2. С. 63–75. <https://doi.org/10.31857/S0131164620010063>

20. Alonge P., Gadaleta G., Urbano G., Lupica A., Di Stefano V., Brighina F., Torrente A. The Role of Brain Plasticity in Neuromuscular Disorders: Current Knowledge and Future Prospects // Brain Sci. 2024. Vol. 14, № 10. Art. № 971. <https://doi.org/10.3390/brainsci14100971>

21. Meeusen R., Watson P., Hasegawa H., Roelands B., Piacentini M.F. Central Fatigue: The Serotonin Hypothesis and Beyond // Sports Med. 2006. Vol. 36, № 10. P. 881–909. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636100-00006>

22. Орел В.Р., Тамбовцева Р.В., Шитя А.А., Гацунаев А.Н. Изменения показателей центральной гемодинамики и сосудистой нагрузки сердца у лучников при моделировании натяжения лука // Вестн. новых мед. технологий. 2015. Т. 22, № 3. С. 102–107.

23. Гримак Л.П. Психология активности человека: психологические механизмы и приемы саморегуляции. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 366 с.

24. Рожков В.П., Трифонов М.И., Сороко С.И. Отражение процесса созревания ЦНС у детей и подростков северного региона РФ в динамике интегральных параметров ЭЭГ // Журн. высш. нерв. деятельности. 2021. Т. 71, № 4. С. 529–546. <https://doi.org/10.31857/S0044467721040067>

25. Warfield E., Esposito P., Braun-Trocchio R. Differences in Relaxation and Imagery Among NCAA Division I Sport Types // Sports (Basel). 2023. Vol. 11, № 11. Art. № 224. <https://doi.org/10.3390/sports11110224>

26. Долецкий А.Н., Хвастунова И.В., Ахундова Р.Е., Мигулина А.А. Нейрофизиологические механизмы реализации немедикаментозной релаксации // Вестн. Волгогр. гос. мед. ун-та. 2013. № 1(45). С. 114–118.

References

1. Latyshevskaya N.I., Alborova M.A., Davydenko L.A., Filatov B.N. Working Conditions and Prevalence of Musculoskeletal Pain in Metalworking Machine Operators. *Meditina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2022, vol. 62, no. 1, pp. 53–58 (in Russ.). <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-1-53-58>

2. Podchufarova E.V. Lumbosacral Pain: Delivery of Care to Patients in the United Kingdom. *Neurol. Neuropsychiatry Psychosom.*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 75–80 (in Russ.). <https://doi.org/10.14412/2074-2711-2014-2-75-80>

3. Chernikova E.F., Troshin V.V., Nekrasova M.M., Zuev A.V. Professional Conditioning of the Formation of Diseases of the Musculoskeletal System in Traffic Police Inspectors. *Meditina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2019, vol. 1, no. 10, pp. 899–904 (in Russ.). <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-10-899-904>
4. Sherstyuk S.A., Aseeva A.Yu., Sherstyuk M.A. Novye aspekty otsenki adaptatsii k fizicheskim nagruzкам: fiziologicheski sportivnoe serdtse i transmitral'nyy krovotok v usloviyakh aerobno-anaerobnogo metabolizma myshechnoy deyatel'nosti [New Aspects of Assessment of Adaptation to Physical Exertion: Athlete's Heart and Transmitral Blood Flow in the Conditions of Aerobic-Anaerobic Metabolism of Muscle Activity]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2020, no. 8-2, pp. 80–86. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.048>
5. Alhumaid W., Small S.D., Kirkham A.A., Becher H., Pituskin E., Prado C.M., Thompson R.B., Haykowsky M.J., Paterson D.I. A Contemporary Review of the Effects of Exercise Training on Cardiac Structure and Function and Cardiovascular Risk Profile: Insights from Imaging. *Front. Cardiovasc. Med.*, 2022, vol. 9. Art. no. 753652. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.753652>
6. Montero D., Roche E., Martinez-Rodriguez A. The Impact of Aerobic Exercise Training on Arterial Stiffness in Pre- and Hypertensive Subjects: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Int. J. Cardiol.*, 2014, vol. 173, no. 3, pp. 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2014.03.072>
7. Brouwer N.P., Kingma I., van Dijk W., van Dieën J.H. Can Intermittent Changes in Trunk Extensor Muscle Length Delay Muscle Fatigue Development? *J. Biomech.*, 2024, vol. 162. Art. no. 111881. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111881>
8. Choi H.-M., Stebbins C.L., Lee O.-T., Nho H., Lee J.-H., Chun J.-M., Kim K.-A., Kim J.-K. Augmentation of the Exercise Pressor Reflex in Prehypertension: Roles of the Muscle Metaboreflex and Mechanoreflex. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 2013, vol. 38, no. 2, pp. 209–215. <https://doi.org/10.1139/apnm-2012-0143>
9. Bosch T., de Looze M.P., van Dieën J.H. Development of Fatigue and Discomfort in the Upper Trapezius Muscle During Light Manual Work. *Ergonomics*, 2007, vol. 50, no. 2, pp. 161–177. <https://doi.org/10.1080/00140130600900282>
10. Rivera-Oliver M., Moreno E., Álvarez-Bagnarol Y., Ayala-Santiago C., Cruz-Reyes N., Molina-Castro G.C., Clemens S., Canela E.I., Ferré S., Casadó V., Díaz-Ríos M. Adenosine A₁-Dopamine D₁ Receptor Heteromers Control the Excitability of the Spinal Motoneuron. *Mol. Neurobiol.*, 2019, vol. 56, no. 2, pp. 797–811. <https://doi.org/10.1007/s12035-018-1120-y>
11. Chelnokov A.A., Roshchina L.V., Gladchenko D.A., Pivovarova E.A., Piskunov I.V., Gorodnichev R.M. The Effect of Transcutaneous Electrical Spinal Cord Stimulation on the Functional Activity of Spinal Inhibition in the System of Synergistic Muscles of the Lower Leg in Humans. *Hum. Physiol.*, 2022, vol. 48, no. 2, pp. 121–133. <https://doi.org/10.1134/S0362119722020037>
12. Kourova O.G., Popova T.V., Koryukalov Yu.I. Body Response to Local Muscular Performance of Individuals Engaged in Various Professional Occupations. *Occup. Dis. Environ. Med.*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 71–75. <https://doi.org/10.4236/odem.2014.23008>
13. Livanov M.N., Khrizman T.P. Prostranstvenno-vremennaya organizatsiya biopotentsialov mozga u cheloveka [Spatio-Temporal Organization of Human Cerebral Biopotentials]. Smirnov A.A. et al. (eds.). *Estestvenno-nauchnye osnovy psichologii* [Natural-Scientific Foundations of Psychology]. Moscow, 1978, pp. 206–233.
14. Li H., Yao R., Xia X., Yin G., Deng H., Yang P. Adjustment of Synchronization Stability of Dynamic Brain-Networks Based on Feature Fusion. *Front. Hum. Neurosci.*, 2019, vol. 13. Art. no. 98. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00098>
15. Mannan M.M.N., Jeong M.Y., Kamran M.A. Hybrid ICA – Regression: Automatic Identification and Removal of Ocular Artifacts from Electroencephalographic Signals. *Front. Hum. Neurosci.*, 2016, vol. 10. Art. no. 193. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00193>
16. Popova T., Koryukalov Yu., Erlikh V., Kourova O. Neurophysiological Analysis of Adaptation Processes Rhythmicity in Athletes and Subjects Who Practice Relaxation: Experimental Study. *Med. Sport*, 2020, vol. 73, no. 4, pp. 610–625. <https://doi.org/10.23736/S0025-7826.20.03414-6>
17. Popova T.V., Koryukalov Yu.I., Morokko D.A. Central Mechanisms of Fatigue During Local Static Muscular Activity. *Hum. Physiol.*, 2007, vol. 33, no. 4, pp. 467–472. <https://doi.org/10.1134/S0362119707040135>
18. Baranov V.M., Baevskiy R.M., Berseneva A.P., Mikhaylov V.M. Otsenka adaptatsionnykh vozmozhnostey organizma i zadachi povysheniya effektivnosti zdravookhraneniya [Evaluation of Adaptive Abilities of an Organism and Tasks of Healthcare Effectiveness Increase]. *Ekologiya cheloveka*, 2004, no. 6, pp. 25–29.

19. Dick O.E., Svyatogor I.A., Reznikova T.N., Fedoryaka D.A., Nozdrachev A.D. Analysis of EEG Patterns in Subjects with Panic Attacks. *Hum. Physiol.*, 2020, vol. 46, no. 2, pp. 163–174. <https://doi.org/10.1134/S0362119720010065>
20. Alonge P., Gadaleta G., Urbano G., Lupica A., Di Stefano V., Brighina F., Torrente A. The Role of Brain Plasticity in Neuromuscular Disorders: Current Knowledge and Future Prospects. *Brain Sci.*, 2024, vol. 14, no. 10. Art. no. 971. <https://doi.org/10.3390/brainsci14100971>
21. Meeusen R., Watson P., Hasegawa H., Roelands B., Piacentini M.F. Central Fatigue: The Serotonin Hypothesis and Beyond. *Sports Med.*, 2006, vol. 36, no. 10, pp. 881–909. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636100-00006>
22. Orel V.R., Tambovtseva R.V., Shitya A.A., Gatsunaev A.N. Izmeneniya pokazateley tsentral'noy gemodinamiki i sosudistoy nagruzki serdtsa u luchnikov pri modelirovaniyu natyazheniya luka [Central Hemodynamic and Vascular Resistances in the Archers in the Simulation of the Draw]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 102–107.
23. Grimak L.P. *Psikhologiya aktivnosti cheloveka: psikhologicheskie mekhanizmy i priemy samoregulyatsii* [Psychology of Human Activity: Psychological Mechanisms and Techniques of Self-Regulation]. Moscow, 2010. 366 p.
24. Rozhkov V.P., Trifonov M.I., Soroko S.I. Otrazhenie protsessa sozrevaniya TsNS u detey i podrostkov severnogo regiona RF v dinamike integral'nykh parametrov EEG [CNS Development in Children and Adolescents of the Russian Federation Northern Region and Its Reflection in the Dynamics of Integral EEG Parameters]. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti*, 2021, vol. 71, no. 4, pp. 529–546. <https://doi.org/10.31857/S0044467721040067>
25. Warfield E., Esposito P., Braun-Trocchio R. Differences in Relaxation and Imagery Among NCAA Division I Sport Types. *Sports (Basel)*, 2023, vol. 11, no. 11. Art. no. 224. <https://doi.org/10.3390/sports11110224>
26. Doletskiy A.N., Khvastunova I.V., Akhundova R.E., Migulina A.A. Neyrofiziologicheskie mekhanizmy realizatsii nemedikamentoznoy relaksatsii [Neurophysiological Mechanisms of Relaxation]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta*, 2013, no. 1, pp. 114–118.

Поступила в редакцию 28.01.2025 / Одобрена после рецензирования 17.04.2025 / Принята к публикации 22.04.2025.
Submitted 28 January 2025 / Approved after reviewing 17 April 2025 / Accepted for publication 22 April 2025.