

# ТЕХНОЛОГИИ АДАПТИВНОЙ НЕЙРОСТИМУЛЯЦИИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ В КОГНИТИВНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ СПЕЦИАЛИСТА

DOI: 10.17691/stm2022.14.4.04

УДК 616.8–009.7–057:615.8

Поступила 15.04.2022 г.

**А.И. Федотчев**, д.б.н., ведущий научный сотрудник лаборатории механизмов рецепции

Институт биофизики клетки РАН — обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», ул. Институтская, 3, Пушкино, Московская область, 142290

**Цель исследования** — оценить эффективность двух вариантов технологии адаптивной нейростимуляции с обратной связью от собственных ритмических процессов человека для увеличения функциональной надежности и когнитивной реабилитации специалистов высокотехнологичных видов деятельности.

**Материалы и методы.** В исследовании приняли участие специалисты, обратившиеся в поликлинику с жалобами на профессиональные болевые синдромы и состояние производственного стресса. Для лечения болевых синдромов использовали обезболивающую электронейростимуляцию с параметрами, автоматически модулируемыми сигналами обратной связи от ритма дыхания испытуемого. Для коррекции стресс-вызванных состояний применяли музыкальную стимуляцию, автоматически модулируемую сигналами обратной связи от узкочастотных ритмических компонентов ЭЭГ испытуемого — альфа-ЭЭГ-осцилляторов. В качестве контроля служили лечебные процедуры без обратной связи от ритмических процессов.

**Результаты.** В контроле, где обратная связь от ритмических процессов человека отсутствовала, значимых эффектов стимуляции не отмечено. При электростимуляции, управляемой ритмом дыхания пациента (эксперимент 1), наиболее значимые изменения наблюдались в субъективных оценках боли, которые снизились вдвое. Значимый рост отмечен в мощности альфа-ритма ЭЭГ, амплитуде дыхания и субъективных оценках самочувствия и настроения. При музыкальной стимуляции, автоматически управляемой ритмическими компонентами ЭЭГ пациента (эксперимент 2), отмечалось статистически значимое увеличение мощности альфа-ритма ЭЭГ, а также снижение уровня эмоциональной дезадаптации и стресса.

**Заключение.** Полученные данные убедительно свидетельствуют, что разработанные и опробованные технологии адаптивной нейростимуляции могут быть использованы для своевременной коррекции функционального состояния и когнитивной реабилитации специалистов высокотехнологичных видов деятельности за счет эффективного устранения рисков их функциональной надежности, вызванных производственной болью и стрессом.

**Ключевые слова:** функциональная надежность и безопасность деятельности специалиста; когнитивная реабилитация; неинвазивная сенсорная стимуляция; автоматическая модуляция; ритмические процессы; коррекция функционального состояния.

**Как цитировать:** Fedotchev A.I. Closed-loop adaptive neurostimulation technologies in cognitive rehabilitation of high-tech specialists. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2022; 14(4): 34, <https://doi.org/10.17691/stm2022.14.4.04>

## English

## Closed-Loop Adaptive Neurostimulation Technologies in Cognitive Rehabilitation of High-Tech Specialists

**A.I. Fedotchev**, DSc, Leading Researcher, Laboratory of Reception Mechanisms

Institute of Cell Biophysics of the Russian Academy of Sciences, 3 Institutskaya St., Pushchino, Moscow Region, 142290, Russia

**The aim of the study** was to experimentally evaluate the applicability and effectiveness of two variants of the technology of adaptive neurostimulation with feedback from a person's own rhythmic processes to increase the functional reliability and to reach cognitive rehabilitation of high-tech specialists.

Для контактов: Федотчев Александр Иванович, e-mail: [fedotchev@mail.ru](mailto:fedotchev@mail.ru)

**Materials and Methods.** The study involved specialists who applied to the clinic with complaints of occupational pain syndromes and work stress. For the treatment of pain syndromes, analgesic electrical nerve stimulation was used with the parameters automatically modulated by feedback signals from the subject's breathing rhythm. To correct stress-induced states, musical stimulation was used, automatically modulated by feedback signals from the narrow-band rhythmic components of the electroencephalogram (EEG) of the subject — alpha EEG oscillators. Treatment procedures without feedback from rhythmic processes were used as a control.

**Results.** In the control sessions without the feedback from human rhythmic processes, no significant effects of stimulation were noted. With electrical stimulation controlled by the patient's breathing (experiment 1), the most significant changes were observed in subjective pain scores, which dropped by half. A significant increase was noted in the power of the EEG alpha rhythm, respiration amplitude, and subjective ratings of well-being and mood. With music stimulation automatically modulated by the rhythmic components of the patient's EEG (experiment 2), there was a significant increase in the power of the EEG alpha rhythm, as well as a decrease in the level of emotional disadaptation and stress.

**Conclusion.** The data obtained clearly indicate that the developed and tested technologies of adaptive neurostimulation can be used for the timely correction of the functional state and cognitive rehabilitation of high-tech specialists by effectively eliminating the risks of their functional reliability caused by occupational pain and stress.

**Key words:** functional reliability and safety of a specialist; cognitive rehabilitation; non-invasive sensory stimulation; automatic modulation; human endogenous rhythms; stress-induced state correction.

## Введение

Взаимодействие человека и машины — быстро развивающаяся область исследований, в которой особенно важно учитывать роль человеческого фактора [1]. Одним из основных направлений современных исследований человеческого фактора является проблема надежности человека-оператора, играющая ключевую роль во взаимодействии человека и техники при эксплуатации сложных систем [2]. Надежность человека-оператора включает как минимум три аспекта: личную, профессиональную и функциональную надежность специалиста [3]. Функциональная надежность связана с рисками отказа или ошибки оператора в результате ряда психологических и физиологических состояний специалиста [4]. Как показывает анализ литературы, наиболее частыми провоцирующими эти риски состояниями являются болевые синдромы [5–6], скелетно-мышечные нарушения [7–8] и стресс-индуцированные состояния [9–10]. В ходе современной технологической революции здоровье и безопасность специалиста подвергаются рискам, неотъемлемо связанным с автоматизированными инструментами, а также психосоциальному стрессу. Для противостояния этим рискам необходима разработка эффективных практических превентивных и защитных мер [11].

Одно из возможных решений данной проблемы — анализ тенденций нейроэргономики, связанных с созданием и проектированием систем нейроинтерфейсов, которые наиболее перспективны благодаря использованию структур обработки информации, имеющихся у человека, включая тело и мозг [12]. В частности, для снижения связанных с работой рисков надежности и безопасности специалиста и достижения его когнитивной реабилитации может быть успешно использована технология адаптивной нейростимуляции с обратной связью от ритмов мозга и тела человека. Преимущества использования автоматической

обратной связи от эндогенных ритмов человека в процедурах неинвазивной адаптивной нейростимуляции детально рассмотрены в недавних работах [13–14].

Ранее нами были разработаны и протестированы две оригинальные версии адаптивной нейростимуляции с обратной связью от эндогенных ритмов человека. В первом пилотном исследовании [15] у добровольцев, страдающих болями различной этиологии, использовали обезболивающую электронейростимуляцию с автоматической модуляцией параметров раздражающего тока частотой дыхания пациента. Уже после однократной лечебной процедуры субъективные оценки боли значительно снижались. В другом пилотном исследовании [16] для защиты здоровья человека был применен оригинальный вариант музыкальной терапии под названием «Музыка мозга». Этот метод использует предъявление в режиме онлайн музыки или музыкальных стимулов, модулируемых сигналами обратной связи от дискретных компонентов ЭЭГ-субъекта, — мальфа-ЭЭГ-осцилляторов. Показано, что предъявление музыки, автоматически модулированной альфа-ЭЭГ-осцилляторами пациента, приводит к снижению уровня стресса, нормализации ЭЭГ и положительным сдвигам в психоэмоциональном статусе испытуемых.

Несмотря на положительные результаты описанных пилотных исследований, их значимость ограничена отсутствием объективного контроля. Для адекватной оценки разработанных подходов необходимо сравнить эффекты одного и того же вида стимуляции при наличии и отсутствии обратной связи от ритмических процессов субъекта. Кроме того, до сих пор неясно, могут ли и как должны применяться методы адаптивной нейростимуляции с обратной связью для устранения рисков, связанных с функциональной надежностью специалиста.

**Цель настоящего исследования** — экспериментальная оценка эффективности двух вариантов технологии адаптивной нейростимуляции с обратной

связью от собственных ритмических процессов человека для устранения рисков функциональной надежности и безопасности специалиста, вызванных болевым синдромом или стрессом на работе.

Для этого были проведены два эксперимента, в которых участники подвергались в случайном порядке воздействию стимуляции с наличием или отсутствием обратной связи от ритмических процессов. Эксперимент 1 направлен на оценку эффективности электронейростимуляции, автоматически модулируемой сигналами обратной связи от частоты дыхания пациента, при устранении профессиональных болевых синдромов. Эксперимент 2 ориентирован на оценку эффективности светомузыкальной стимуляции, автоматически модулируемой ЭЭГ-осцилляторами пациента, для коррекции функциональных нарушений, вызванных стрессом.

## Эксперимент 1

### Материалы и методы

В данном эксперименте специалисты, страдающие от различных болевых синдромов, участвовали в двух лечебных сеансах, чередующихся в произвольном порядке. В одном из двух сеансов (экспериментальном) им проводили обезболивающую чрескожную электронейростимуляцию, интенсивность которой в режиме онлайн модулировалась частотой дыхания испытуемого (рис. 1). В другом сеансе (контрольном) такую же стимуляцию применяли с постоянной интенсивностью без дыхательной обратной связи.

**Участники** — 14 пациентов Больницы Пушкинского научного центра РАН (5 женщин и 9 мужчин в возрасте от 35 до 62 лет). Это были ответственные специалисты, занимающиеся высокотехнологичными видами деятельности, — программисты, операторы ПК, системные администраторы и водители пассажирских автобусов. Они жаловались на профессиональные болевые синдромы (стрессовые головные боли, боли в шее, боли в запястьях). Участников проинформировали о целях и методологии исследования и попросили подписать форму письменного согласия. Формы информированного согласия и все материалы исследования были одобрены комиссией по этике Института биофизики клетки РАН — обособленного



Рис. 1. Основные элементы электронейростимуляции, модулируемой ритмом дыхания пациента

подразделения Федерального исследовательского центра «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН». Исследование проводили в соответствии с Хельсинкской декларацией (2013).

**Анкетирование.** В начале и в конце каждого обследования у каждого пациента оценивали уровень боли с помощью стандартного VAS-теста (visual analogue scale) самооценки болевых ощущений по 10-балльной шкале [17]. Психологическое тестирование проводили с использованием стандартного российского теста САН (самочувствие–активность–настроение), который позволяет испытуемому оценить текущее состояние собственного здоровья, активности и настроения. Тест включал выставление баллов от 1 до 7 в 30 предъявляемых по предложенной форме, по 10 в каждой из трех шкал. Суммы баллов по каждой из шкал служили показателями самочувствия, активности и настроения [18].

**Регистрация физиологических данных.** После начального психологического тестирования испытуемым устанавливали датчики для регистрации электрофизиологических характеристик, а также датчик дыхания и стимулирующие электроды, располагающиеся вблизи источника максимальных болевых ощущений. Для регистрации дыхания использовали резистивный датчик дыхания, закрепленный на груди испытуемого. Затем в течение 2 мин записывали фоновые электрофизиологические характеристики (ЭЭГ и паттерн дыхания). Монопольную ЭЭГ регистрировали от левого затылочного отведения (точка О1 по международной системе 10–20%) с комбинированным ушным референтом. ЭЭГ усиливали и оцифровывали с помощью многоканального усилителя ЭЭГ VrainSys (Hardsoft, Россия) с частотой дискретизации 128 Гц, режекторным фильтром на частоте 50 Гц и полосовым фильтром 0,5–60,0 Гц. Одновременно с ЭЭГ регистрировали и обрабатывали паттерн дыхания испытуемого.

**Стимуляция.** После регистрации исходных электрофизиологических показателей как в экспериментальном, так и в контрольном сеансах в течение 15 мин проводили электростимуляцию. Использовали серийный чрескожный электронейростимулятор ЭТНС-100-01 (Ковровский электро-механический завод, Россия) с электрическими импульсами частотой 4 Гц и максимальной силой тока 10 мА. В ходе экспериментальных сеансов амплитуда электрических импульсов автоматически модулировалась собственным дыхательным ритмом пациента в пределах 0,1–10,0 мА за счет включения сигналов обратной связи от дыхания испытуемого в выходную цепь стимулятора. Чем глубже был вдох испытуемого, тем интенсивнее была стимуляция. В контрольных сеансах датчик дыхания отключали от нейростимулятора, и интенсивность стимуляции постоянно поддерживали на среднем уровне 5 мА. После стимуляции повторно регистрировали электрографические показатели.

**Анализ данных.** Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ Sigma-Plot 11.0. После прохождения критерия нормальности распределения данных Шапиро–Уилка, для оценки статистической значимости сдвигов по каждому показателю после лечения, использовали многофакторный дисперсионный анализ ANOVA. Апостериорный тест с поправкой Бонферрони (доверительный интервал — 0,05 или 95%) применяли для определения разницы между контрольной и экспериментальной сессиями. С помощью парного t-критерия определяли средние значения (M) и стандартные отклонения ( $\sigma$ ) сдвигов показателей после лечения относительно фона и оценивали уровни значимости этих сдвигов. Значения считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

## Результаты

Эффективность воздействий в контрольном (без обратной связи) и экспериментальном (электростимуляция, модулируемая дыханием пациента) сеансах оценивали путем сравнения сдвигов основных показателей в результате лечения (табл. 1).

Значимые эффекты лечения отмечались только в экспериментальных процедурах. При электростимуляции, модулируемой дыханием испытуемого, регистрировались статистически значимые сдвиги как объективных, так и субъективных показателей. Среди значимых изменений объективных электрофизиологических характеристик отмечены рост мощности альфа-ЭЭГ и изменение характера дыхания, которое учащается и имеет увеличенную амплитуду. Согласно опросам, проведенным после лечения, испытуемые начинали дышать глубже, чтобы усилить положительный эффект обезболивания.

Т а б л и ц а 1

**Средние величины сдвигов объективных и субъективных показателей после лечения (эксперимент 1)**

Показатели	Сессия			
	Контроль		Эксперимент	
	M $\pm\sigma$	p	M $\pm\sigma$	p
Мощность альфа-ритма ЭЭГ, отн. ед.	0,43 $\pm$ 1,45	0,290	1,21 $\pm$ 1,31	<b>0,004</b>
Ритм дыхания, циклов в минуту	0,36 $\pm$ 1,0	0,208	1,43 $\pm$ 2,21	<b>0,031</b>
Амплитуда дыхания, мкВ	0,28 $\pm$ 1,85	0,575	5,86 $\pm$ 2,31	<b>0,001</b>
Уровень боли, баллы	-0,21 $\pm$ 0,58	0,189	-1,64 $\pm$ 0,63	<b>0,001</b>
Тест САН, баллы:				
самочувствие	1,21 $\pm$ 2,70	0,116	1,86 $\pm$ 0,77	<b>0,001</b>
активность	-0,43 $\pm$ 1,40	0,272	0,21 $\pm$ 0,97	0,426
настроение	0,36 $\pm$ 1,0	0,208	1,14 $\pm$ 1,40	<b>0,009</b>

Пр и м е ч а н и е: p — статистическая значимость различий значений относительно исходного уровня.

При электростимуляции, модулируемой дыханием пациента, наиболее существенные изменения наблюдались в субъективных оценках уровня боли. Уменьшение уровня боли сопровождалось статистически значимым повышением количества баллов в тесте САН.

## Обсуждение

Чрескожная электрическая нейростимуляция (ЧЭНС) — это немедикаментозное вмешательство, которое активирует сложную нейронную сеть для устранения боли путем активации нисходящих тормозных систем в ЦНС [19]. В настоящее время использование ЧЭНС в качестве средства обезболивания является общепринятым [20]. Тем не менее доступные методы лечения с помощью ЧЭНС связаны с рядом проблем [21]. Для достижения существенного обезболивания считаются перспективными нейромодулирующие приемы, которые могут изменять мозговые процессы, лежащие в основе болевых ощущений [22].

В нашем исследовании наиболее выраженные обезболивающие эффекты, сопровождающиеся статистически значимыми изменениями объективных и субъективных характеристик, зарегистрированы при ЧЭНС с использованием дыхания пациента в качестве модулирующего фактора. Известно, что дыхание определяет фундаментальный ритм работы мозга. Дыхание через многочисленные сенсорные пути модулирует временную организацию корковой нейродинамики, тем самым связывая высшие корковые функции с процессом дыхания [23–24]. Дыхание может выступать в качестве организующего иерархического принципа для нейронных колебаний по всему мозгу и обуславливать механизмы влияния когнитивных факторов на интероцептивные нейронные процессы [25].

Рассмотренные представления дают основание предположить, что за счет модуляции амплитуды электрической стимуляции собственным ритмом дыхания пациента происходит резонансная активация структур головного мозга, которые получают сигналы, продуцируемые ЧЭНС, и опосредуют управление болью. Используя адаптивную электростимуляцию, автоматически модулируемую дыханием пациента, можно эффективно устранять риски функциональной надежности специалиста, вызванные производственной болью, и осуществлять его когнитивную реабилитацию.

## Эксперимент 2

### Материалы и методы

В данном эксперименте специалисты высокотехнологичных видов деятельности, страдающие от стресса на работе, участвовали в двух исследованиях. В одном из исследований (экспериментальном) им

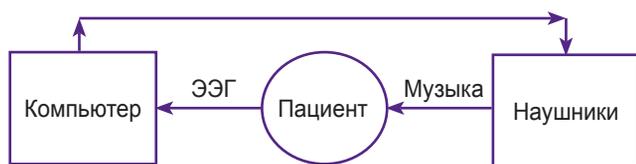


Рис. 2. Схема коррекции стресс-вызванных расстройств с помощью музыкальной стимуляции, управляемой ЭЭГ-осцилляторами пациента

предъявляли классическую музыку с громкостью, которая в режиме реального времени модулировалась альфа-ЭЭГ-осциллятором пациента (рис. 2). В другом исследовании (контроль) использовали ту же музыкальную стимуляцию, но без обратной связи по ЭЭГ.

**Участники** — 17 специалистов, исследователей и программистов (8 женщин, 9 мужчин в возрасте от 35 до 62 лет). Они жаловались на психоэмоциональное напряжение и стресс из-за неотложной нагрузки и добровольно дали согласие на участие в лечебных сеансах. Участников проинформировали о целях и методологии исследования и попросили спокойно сидеть с закрытыми глазами и слушать звуки через наушники. Всем исследуемым было предложено подписать форму письменного согласия. Формы информированного согласия и все материалы исследования были одобрены комиссией по этике Института биофизики клетки РАН — обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Пушинский научный центр биологических исследований РАН». Исследование проводили в соответствии с Хельсинкской декларацией (2013).

**Анкетирование.** В начале и в конце каждого лечебного сеанса пациенты проходили психологическое тестирование с использованием трех описанных ранее стандартных российских тестов [26]. В тесте САН участников просили провести оценку своего текущего самочувствия, активности и настроения, проставив баллы по 7-балльной шкале между 30 парами прилагательных, указывающими на противоположные оценки этих трех состояний. Суммы баллов, набранные для каждого из состояний в 10 предъявлениях, служили показателями текущего уровня самочувствия, активности и настроения испытуемого.

В тесте УЭД (уровень эмоциональной дезадаптации) участникам предъявляли круг, разделенный на 4 сектора. Внутри каждого сектора были прилагательные, описывающие эмоциональное состояние человека, соответствующее четырем основным потребностям личности: безопасность, независимость, достижение, единство-близость. Пациентам предлагалось за три попытки выбрать сектор, соответствующий их текущему состоянию. Каждый сектор имел свою оценку (от 1 до 4), которую не показывали участнику. Набранная сумма баллов служила показателем степени эмоциональной дезадаптации человека.

Тест УС (уровень стрессированности) был аналогичен тесту УЭД, но прилагательные соответствовали уровню стресса человека и позволяли оценивать текущий уровень его стрессированности.

**Регистрация и анализ ЭЭГ.** Монополярную ЭЭГ регистрировали от левого затылочного отведения (точка О1 по международной системе 10–20%) с комбинированным ушным референтом. ЭЭГ усиливали и оцифровывали с помощью многоканального усилителя ЭЭГ Brainsys (Hardsoft, Россия) с частотой дискретизации 128 Гц, режекторным фильтром на частоте 50 Гц и полосовым фильтром 0,5–60,0 Гц. При фоновой регистрации ЭЭГ у каждого участника выявляли доминирующие при закрытых глазах узкополосные (0,6 Гц) ЭЭГ-осцилляторы из альфа-диапазона (8–13 Гц). С этой целью процедуры быстро преобразования Фурье выполняли для коротких (5 с) периодов фоновой ЭЭГ, последовательно сдвигаемых друг относительно друга с перекрытием 50%. Для увеличения отношения сигнал/шум при гистограммном накоплении кратковременных спектров учитывались только их локальные максимумы с нулевым наполнением остального спектра.

При последовательном накоплении отдельных спектральных пиков за 30-секундный период фоновой записи ЭЭГ результирующий спектр строится на основе суммирования 11 кратковременных спектров, он имеет частотное разрешение 0,2 Гц и предоставляет информацию об узкополосном (пиковая частота  $\pm 0,2$  Гц) ЭЭГ-осцилляторе. Последний, как известно, является стабильной и важной для индивида характеристикой [27]. Выявленный альфа-ЭЭГ-осциллятор субъекта затем используется для управления с обратной связью музыкальными воздействиями.

**Процедура обследований.** После начального психологического тестирования испытуемым устанавливали датчики ЭЭГ и надевали стереонаушники (Philips SBC HL140, уровень звука — 0–40 дБ, частота — 100–2000 Гц). Затем записывали ЭЭГ в течение 30 с для выявления альфа-осциллятора ЭЭГ у каждого испытуемого. После фоновой записи, в ходе которой участникам предъявляли классическую музыку, регистрация ЭЭГ продолжалась. В одном из двух лечебных сеансов испытуемому предъявляли музыку без обратной связи от ЭЭГ (контроль). В другом сеансе громкость музыки модулировалась текущей амплитудой альфа-ЭЭГ-осциллятора испытуемого (эксперимент). С целью предотвращения артефактов во время обоих сеансов испытуемых просили спокойно сидеть с закрытыми глазами и слушать музыку. В конце каждого эксперимента испытуемых повторно тестировали и опрашивали об их ощущениях во время лечения.

**Стимуляция.** Для каждого испытуемого использовали два типа стимуляции, чередуемые в случайном порядке. В одном из сеансов (контрольном) участники исследования прослушивали 10-минутную композицию из популярной классической музыки Моцарта,

Баха и Шуберта, предварительно записанную на жесткий диск компьютера. Тот же аудиофайл использовали в другом сеансе, где музыка предъявлялась с обратной связью от альфа-ЭЭГ-осциллятора субъекта (музыкальная обратная связь от ЭЭГ). Благодаря специально разработанному программному обеспечению интенсивность звуков музыки модулировалась в режиме онлайн интегральной амплитудой альфа-ЭЭГ-осциллятора испытуемого: чем больше его амплитуда, тем громче музыка, и наоборот.

**Анализ данных.** Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ Sigma-Plot 11.0. После прохождения критерия нормальности распределения Шапиро–Уилка, для оценки статистической значимости сдвигов по каждому показателю после лечения использовали многофакторный дисперсионный анализ ANOVA. Апостериорный тест с поправкой Бонферрони (доверительный интервал 0,05 или 95%) применяли для нахождения различий между контрольным и экспериментальным исследованиями. С помощью парного *t*-критерия определяли средние значения (*M*) и стандартные отклонения ( $\sigma$ ) сдвигов показателей после лечения относительно фона и оценивали уровни значимости этих сдвигов. Значения считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ . Для определения различий между контрольными и экспериментальными условиями использовали критерий суммы рангов Манна–Уитни.

## Результаты

Количественную оценку эффектов для контрольной (прослушивание музыки без обратной связи) и экспериментальной сессии (музыкальная обратная связь от ЭЭГ) проводили путем сравнения сдвигов основных показателей в результате воздействия (табл. 2).

Данные табл. 2 показывают, что мощность альфа-ритма ЭЭГ увеличивается, а мощность тета-ритма ЭЭГ уменьшается после обоих видов лечения. Однако статистически значимое увеличение мощности альфа-ритма отмечено только в сессиях с обратной связью по ЭЭГ. Разница в сдвигах мощности альфа-ЭЭГ между контрольным и экспериментальным сеансами оказалась высокозначимой ( $p < 0,001$ ). Видно также, что в результате лечебных процедур с обратной связью по ЭЭГ происходят положительные изменения субъективных показателей самочувствия и настроения в тесте САН. После обоих видов лечения у испытуемых снизился уровень эмоциональной дезадаптации (тест УЭД) и стресса (тест УС). Однако

Т а б л и ц а 2

Средние величины сдвигов объективных и субъективных показателей после лечения (эксперимент 2)

Показатель	Сессия				p**
	Контроль		Эксперимент		
	M±σ	p*	M±σ	p*	
Мощность альфа-ритма ЭЭГ, отн. ед.	1,3±3,5	0,162	6,0±3,3	0,001	0,001
Мощность тета-ритма ЭЭГ, отн. ед.	-0,5±1,2	0,135	-0,3±1,7	0,493	0,396
Тест САН, баллы:					
самочувствие	1,3±2,9	0,096	4,9±4,5	0,001	0,015
активность	-0,3±3,4	0,721	2,7±5,9	0,090	0,074
настроение	0,7±2,6	0,270	5,5±5,8	0,002	0,006
Тест УЭД — эмоциональная дезадаптация, баллы	-0,1±1,2	0,697	-1,0±1,2	0,005	0,035
Тест УС — уровень стрессированности, баллы	-0,1±1,0	0,817	-1,0±1,0	0,002	0,020

\* статистическая значимость различий значений относительно исходного уровня; \*\* между контрольной и экспериментальной сессиями.

эти изменения достигли уровня значимости только в случае наличия обратной связи от ЭЭГ.

Опрос испытуемых об ощущениях во время экспериментов выявил их положительное отношение к лечебным сеансам, снижение уровня стресса, улучшение эмоционального состояния.

## Обсуждение

Известно, что музыка сама по себе может использоваться для изменения психофизиологического статуса человека [28, 29] и обеспечивать основу для разработки немедикаментозных методов лечения неврологических расстройств [30]. В ряде недавних исследований для управления психическими состояниями и лечения расстройств настроения использовались музыкальные нейроинтерфейсы [31–33].

Целью настоящего исследования была оценка эффективности музыкального нейроинтерфейса на основе ЭЭГ для устранения функциональных нарушений, вызванных стрессом. Для этого эффекты простого прослушивания предварительно записанной классической музыки сравнивали с эффектами, наблюдаемыми в эксперименте, где та же музыка предъявлялась в строгом соответствии с текущей амплитудой альфа-ЭЭГ-осциллятора индивидуума.

Достоверный прирост показателей отмечен только в сессиях с наличием обратной связи по ЭЭГ (эксперимент). На основании литературных данных [34, 35] этот результат можно рассматривать как индикатор состояния релаксационного бодрствования и интернализированного внимания, которое было индуцировано ЭЭГ-модулированным музыкальным воздействием. Из работы [36] также известно, что колебания электрической активности мозга могут быть синхронизированы с временными паттернами внешних воздействий

и обуславливать терапевтические эффекты музыки. О терапевтических эффектах музыкального вмешательства на основе ЭЭГ свидетельствуют статистически значимые положительные изменения показателей самочувствия и настроения испытуемых после лечения, а также достоверное снижение уровня эмоциональной дезадаптации и стресса.

Полученные данные согласуются с результатами недавнего исследования, в котором акустические стимулы, генерируемые в режиме онлайн программным преобразованием доминирующих ритмов ЭЭГ субъекта, использовались для уменьшения симптомов посттравматического стресса [37]. Авторы пришли к выводу, что быстрое обновление собственного паттерна ЭЭГ и резонанс между слышимыми тонами и осцилляторными нейронными сетями дают мозгу возможность автоматической калибровки, самонастройки, «расслабления» и перезагрузки для выработки адекватных реакций на стресс или травму.

Повышенная эффективность музыкального нейроинтерфейса на основе ЭЭГ может быть связана с предъяснением музыки в строгом соответствии с собственными биоэлектрическими характеристиками мозга человека. Оптимальным условием для этого является использование узкополосного осциллятора из альфа-диапазона ЭЭГ, т.е. альфа-ЭЭГ-осциллятора пациента. Как было показано ранее [38], в этом случае создаются условия для оптимального вовлечения интегративных, адаптивных и резонансных механизмов ЦНС в сложные реакции организма на низкоинтенсивные воздействия внешней среды.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности успешного использования музыкальных нейроинтерфейсов на основе ЭЭГ в широком спектре процедур когнитивной реабилитации, в том числе для устранения рисков функциональной надежности и безопасности специалиста, вызванных стрессом.

### Общее обсуждение экспериментов

Результаты предпринятого исследования наглядно демонстрируют преимущества технологий адаптивной нейростимуляции с обратной связью, в которых сенсорная стимуляция автоматически настраивается в ответ на динамические изменения собственной ритмической активности человека. В частности, в эксперименте 1 показано, что при обезболивающей ЧЭНС, модулируемой в режиме онлайн ритмом дыхания пациента, уровень субъективных оценок боли снижается вдвое уже после однократной лечебной процедуры. Эксперимент 2 показал, что при предъяснении музыки, автоматически модулируемой сигналами обратной связи от ЭЭГ-осциллятора пациента, наблюдаются снижение уровня стресса, нормализацию ЭЭГ и положительные сдвиги в психоэмоциональном статусе испытуемых.

Полученные результаты можно объяснить ключевой

особенностью разработанного подхода, связанной с автоматической модуляцией сенсорной стимуляции ритмическими процессами организма человека. Как известно, эти ритмические процессы демонстрируют тесную взаимосвязь [23] и составляют основу гомеостатической стабильности, эффективности физиологических процессов и адаптации к внутренним/внешним изменениям и требованиям [39]. Эндогенные ритмы человека участвуют в ритмическом облегчении сенсорной обработки [40] и являются источником interoцептивных сигналов, играющих важную роль в поддержании оптимального физического, эмоционального и психического здоровья человека [41].

### Заключение

Автоматическая модуляция сенсорной стимуляции эндогенными ритмами человека имеет ряд преимуществ, таких как динамичность и высокая персонализация лечебных процедур, вовлечение interoцептивных сигналов в механизмы мультисенсорной интеграции, нейропластичности и резонансные механизмы мозга, а также автоматическое, без сознательных усилий человека управление лечебной сенсорной стимуляцией. Полученные результаты однозначно свидетельствуют, что разработанные технологии могут быть эффективно использованы для когнитивной реабилитации специалистов высокотехнологических видов деятельности за счет устранения рисков функциональной надежности и безопасности специалиста, вызванных болевым синдромом и производственным стрессом.

**Финансирование исследования.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №22-18-20075.

**Конфликт интересов.** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Благодарности.** Автор благодарит многопрофильную команду специалистов, принимавших участие в первоначальных исследованиях и дальнейшем развитии описанного направления исследований. Особая благодарность докторам Владимиру Круку, Сергею Парину, Софье Полевой, Григорию Радченко, Анне Земляной и молодому исследователю Санг-Джуну О.

### Литература/References

1. Sheridan T.B. Human–robot interaction: status and challenges. *Hum Factors* 2016; 58(4): 525–532, <https://doi.org/10.1177/0018720816644364>.
2. Kaber D., Zahabi M. Enhanced hazard analysis and risk assessment for human-in-the-loop systems. *Hum Factors* 2017; 59(5): 861–873, <https://doi.org/10.1177/0018720817693357>.
3. Крук В.М. К проблеме обеспечения надежности сотрудника. *Живая психология* 2015; 2(3): 221–234, <https://doi.org/10.18334/lp.2.3.35108>.

- Kruk V.M. To the problem of providing employees reliability. *Zhivaya psikhologiya* 2015; 2(3): 221–234, <https://doi.org/10.18334/lp.2.3.35108>.
4. Pan X., Wu Z. Performance shaping factors in the human error probability modification of human reliability analysis. *Int J Occup Saf Ergon* 2020; 26(3): 538–550, <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1498655>.
  5. Bontrup C., Taylor W.R., Fliesser M., Visscher R., Green T., Wippert P.M., Zemp R. Low back pain and its relationship with sitting behavior among sedentary office workers. *Appl Ergon* 2019; 81: 102894, <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102894>.
  6. Saiklang P., Puntumetakul R., Selfe J., Yeowell G. An evaluation of an innovative exercise to relieve chronic low back pain in sedentary workers. *Hum Factors* 2020; 28: 18720820966082, <https://doi.org/10.1177/0018720820966082>.
  7. Gerr F., Fethke N.B., Anton D., Merlino L., Rosecrance J., Marcus M., Jones M.P. A prospective study of musculoskeletal outcomes among manufacturing workers: II. Effects of psychosocial stress and work organization factors. *Hum Factors* 2014; 56(1): 178–190, <https://doi.org/10.1177/0018720813487201>.
  8. Dick R.B., Lowe B.D., Lu M.L., Krieg E.F. Trends in work-related musculoskeletal disorders from the 2002 to 2014 general social survey, quality of work life supplement. *J Occup Environ Med* 2020; 62(8): 595–610, <https://doi.org/10.1097/jom.0000000000001895>.
  9. Dillard M.B., Warm J.S., Funke G.J., Nelson W.T., Finomore V.S., McClernon C.K., Eggemeier F.T., Tripp L.D., Funke M.E. Vigilance tasks: unpleasant, mentally demanding, and stressful even when time flies. *Hum Factors* 2019; 61(2): 225–242, <https://doi.org/10.1177/0018720818796015>.
  10. Körner U., Müller-Thur K., Lunau T., Dragano N., Angerer P., Buchner A. Perceived stress in human-machine interaction in modern manufacturing environments — results of a qualitative interview study. *Stress Health* 2019; 35(2): 187–199, <https://doi.org/10.1002/smi.2853>.
  11. Leso V., Fontana L., Iavicoli I. The occupational health and safety dimension of Industry 4.0. *Med Lav* 2018; 110(5): 327–338, <https://doi.org/10.23749/mdl.v110i5.7282>.
  12. Gramann K., Fairclough S.H., Zander T.O., Ayaz H. Editorial: trends in neuroergonomics. *Front Hum Neurosci* 2017; 11: 165, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00165>.
  13. Fedotchev A., Parin S., Poleyaya S., Zemlyanaya A. Human endogenous rhythms in the development of non-invasive methods of closed-loop adaptive neurostimulation. *J Pers Med* 2021; 11(5): 437, <https://doi.org/10.3390/jpm11050437>.
  14. Fedotchev A., Parin S., Poleyaya S., Zemlyanaya A. EEG-based musical neurointerfaces in the correction of stress-induced states. *Brain Comput Interfaces (Abingdon)* 2022; 9(1): 1–6, <https://doi.org/10.1080/2326263x.2021.1964874>.
  15. Fedotchev A., Kruk V., Oh S.J., Semikin G. Eliminating pain-induced risks of operator reliability via transcutaneous electroneurostimulation controlled by patient's breathing. *Int J Industr Ergonomics* 2018; 68: 256–259, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.08.004>.
  16. Fedotchev A., Radchenko G., Zemlianaia A. Music of the brain approach to health protection. *J Integr Neurosci* 2018; 17: 291–294, <https://doi.org/10.31083/jin-170053>.
  17. Karri J., Li S., Zhang L., Chen Y.T., Stampas A., Li S. Neuropathic pain modulation after spinal cord injury by breathing-controlled electrical stimulation (BreEStim) is associated with restoration of autonomic dysfunction. *J Pain Res* 2018; 11: 2331–2341, <https://doi.org/10.2147/jpr.s174475>.
  18. Доскин В.А., Лаврентьев Н.А., Мирошников М.Н., Шарай В.В. Тест дифференцированной самооценки функционального состояния. *Вопросы психологии* 1973; 19(6): 141–145.
  19. Doskin V.A., Lavrentiev N.A., Miroshnikov M.N., Sharai V.V. Differentiated self-test of functional status. *Voprosy psichologii* 1973; 19(6): 141–145.
  20. Vance C.G., Dailey D.L., Rakel B.A., Sluka K.A. Using TENS for pain control: the state of the evidence. *Pain Manag* 2014; 4(3): 197–209, <https://doi.org/10.2217/pmt.14.13>.
  21. Johnson M. Transcutaneous electrical nerve stimulation: review of effectiveness. *Nurs Stand* 2014; 28(40): 44–53, <https://doi.org/10.7748/ns.28.40.44.e8565>.
  22. Gladwell P.W., Badlan K., Cramp F., Palmer S. Problems, solutions, and strategies reported by users of transcutaneous electrical nerve stimulation for chronic musculoskeletal pain: qualitative exploration using patient interviews. *Phys Ther* 2016; 96(7): 1039–1048, <https://doi.org/10.2522/ptj.20150272>.
  23. Jensen M.P., Day M.A., Miró J. Neuromodulatory treatments for chronic pain: efficacy and mechanisms. *Nat Rev Neurol* 2014; 10(3): 167–178, <https://doi.org/10.1038/nrneuro.2014.12>.
  24. Varga S., Heck D.H. Rhythms of the body, rhythms of the brain: respiration, neural oscillations, and embodied cognition. *Conscious Cogn* 2017; 56: 77–90, <https://doi.org/10.1016/j.concog.2017.09.008>.
  25. Heck D.H., McAfee S.S., Liu Y., Babajani-Feremi A., Rezaie R., Freeman W.J., Wheless J.W., Papanicolaou A.C., Ruzinkó M., Sokolov Y., Kozma R. Breathing as a fundamental rhythm of brain function. *Front Neural Circuits* 2017; 10: 115, <https://doi.org/10.3389/fncir.2016.00115>.
  26. Herrero J.L., Khuvis S., Yeagle E., Cerf M., Mehta A.D. Breathing above the brain stem: volitional control and attentional modulation in humans. *J Neurophysiol* 2018; 119(1): 145–159, <https://doi.org/10.1152/jn.00551.2017>.
  27. Катаев А.А., Бахчина А.В., Полевая С.А., Федотчев А.И. Взаимосвязь между субъективными и объективными оценками функционального состояния человека (апробация методологии быстрой оценки уровня стресса). *Вестник психофизиологии* 2017; 2: 62–67.
  28. Kataev A.A., Bakhchina A.V., Poleyaya S.A., Fedotchev A.I. Connection between subjective and objective estimates of human functional state (approbation of rapid test for measurement of stress level). *Vestnik psychophysiology* 2017; 2: 62–67.
  29. Федотчев А.И., Полевая С.А., Земляная А.А. Эффективность музыкального интерфейса для устранения стресс-индуцированных рисков. *Медицина труда и промышленная экология* 2018; 3: 19–21.
  30. Fedotchev A.I., Poleyaya S.A., Zemlyanaya A.A. Efficiency of musical neuro-interface for removal of risks induced by stress. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya* 2018; 3: 19–21.
  31. Särkämö T. Cognitive, emotional, and neural benefits of musical leisure activities in aging and neurological rehabilitation: a critical review. *Ann Phys Rehabil Med* 2018; 61(6): 414–418, <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.03.006>.
  32. Stewart J., Garrido S., Hense C., McFerran K. Music use for mood regulation: self-awareness and conscious listening choices in young people with tendencies to

depression. *Front Psychol* 2019; 10: 1199, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01199>.

30. Brancatisano O., Baird A., Thompson W.F. Why is music therapeutic for neurological disorders? The Therapeutic Music Capacities Model. *Neurosci Biobehav Rev* 2020; 112: 600–615, <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.02.008>.

31. Ramirez R., Palencia-Lefler M., Giraldo S., Vamvakousis Z. Musical neurofeedback for treating depression in elderly people. *Front Neurosci* 2015; 9: 354, <https://doi.org/10.3389/fnins.2015.00354>.

32. Daly I., Williams D., Kirke A., Weaver J., Malik A., Hwang F., Miranda E., Nasuto S.J. Affective brain–computer music interfacing. *J Neural Eng* 2016; 13(4): 046022, <https://doi.org/10.1088/1741-2560/13/4/046022>.

33. Ehrlich S.K., Agres K.R., Guan C., Cheng G. A closed-loop, music-based brain-computer interface for emotion mediation. *PLoS One* 2019; 14(3): e0213516, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213516>.

34. Bazanova O.M., Vernon D. Interpreting EEG alpha activity. *Neurosci Biobehav Rev* 2014; 44: 94–110, <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.05.007>.

35. Eidelman-Rothman M., Levy J., Feldman R. Alpha oscillations and their impairment in affective and post-traumatic stress disorders. *Neurosci Biobehav Rev* 2016; 68: 794–815, <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.07.005>.

36. Laffont I., Dalla Bella S. Music, rhythm, rehabilitation

and the brain: from pleasure to synchronization of biological rhythms. *Ann Phys Rehabil Med* 2018; 61(6): 363–364, <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2018.10.001>.

37. Tegeler C.L., Shaltout H.A., Lee S.W., Simpson S.L., Gerdes L., Tegeler C.H. Pilot trial of a noninvasive closed-loop neurotechnology for stress-related symptoms in law enforcement: improvements in self-reported symptoms and autonomic function. *Glob Adv Health Med* 2020; 9: 2164956120923288, <https://doi.org/10.1177/2164956120923288>.

38. Fedotchev A.I., Bondar' A.T., Bakhchina A.V., Parin S.B., Polevaya S.A., Radchenko G.S. Effects of musical acoustic signals controlled by the subject's EEG oscillators. *Neurosci Behav Physiol* 2017; 47: 47–51, <https://doi.org/10.1007/s11055-016-0365-z>.

39. Riganello F., Prada V., Soddu A., di Perri C., Sannita W.G. Circadian rhythms and measures of CNS/autonomic interaction. *Int J Environ Res Public Health* 2019; 16(13): 2336, <https://doi.org/10.3390/ijerph16132336>.

40. Haegens S., Zion Golumbic E. Rhythmic facilitation of sensory processing: a critical review. *Neurosci Biobehav Rev* 2018; 86: 150–165, <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.12.002>.

41. Quadt L., Critchley H.D., Garfinkel S.N. The neurobiology of interoception in health and disease. *Ann N Y Acad Sci* 2018; 1428(1): 112–128, <https://doi.org/10.1111/nyas.13915>.