
ОБЗОРЫ

ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАРУШЕННЫХ КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ НЕИНВАЗИВНОЙ АКТИВАЦИИ МЕХАНИЗМОВ НЕЙРОПЛАСТИЧНОСТИ

А.И.Федотчев

Институт биофизики клетки РАН — обособленное подразделение ФИЦ Пущинский научный центр биологических исследований РАН, Пущино, РФ

Негативные последствия разнообразных когнитивных нарушений, сопровождающих многие заболевания ЦНС, требуют создания надёжных средств восстановления нарушенных когнитивных функций. Перспективной является активно развивающаяся область исследований, в которых успешно используется неинвазивная стимуляция мозга, вовлекающая в лечебный процесс механизмы нейропластичности. Проведён анализ публикаций последних 5 лет о неинвазивных воздействиях в зависимости от условий и параметров их организации. Проанализированы примеры успешного применения неинвазивной стимуляции мозга с наличием и отсутствием обратной связи от собственных биоэлектрических характеристик пациента, а также с предварительной активацией процессов нейропластичности с помощью прайминга. Представлены результаты собственных исследований, демонстрирующие возможности восстановления нарушенных когнитивных функций с помощью ЭЭГ-управляемой светомузыкальной стимуляции.

Ключевые слова: когнитивные нарушения; коррекция; активация механизмов нейропластичности; неинвазивная стимуляция мозга

Поиск надёжных средств восстановления нарушенных когнитивных функций является актуальным направлением современной клинической медицины. Когнитивные нарушения относятся к числу самых распространённых видов неврологических расстройств, которые встречаются при многих заболеваниях. Когнитивный дефицит оказывает негативное влияние на качество жизни и вызывает нарушение бытовой, социальной и профессиональной активности, нередко приводя к инвалидизации и полной зависимости от окружающих. Этими обстоятельствами определяется значимость и акту-

альность раннего выявления и своевременного восстановления нарушенных когнитивных функций.

При рассмотрении возможных подходов к коррекции когнитивных нарушений следует иметь в виду, что в основе восстановления повреждённых функций лежат процессы нейропластичности, в которых главную роль играет реорганизация корковых сетей, а не репарация тканей как таковая [1]. Нейропластичность — свойство нервной системы изменять структурно-функциональную организацию за счёт молекулярных, ультраструктурных, клеточных механизмов и межклеточных взаимодействий [2].

Специальными исследованиями доказана способность коры к значительным функциональным перестройкам под влиянием афферентной стимуляции [3]. Наиболее перспективными

Адрес для корреспонденции: fedotchev@mail.ru. Федотчев А.И.

DOI 10.47056/0365-9615-2024-178-10-400-405

методами афферентной стимуляции, способными активировать механизмы нейропластичности, считаются методы неинвазивной стимуляции мозга, включая транскраниальные электрические и магнитные воздействия, а также низкоинтенсивную сенсорную стимуляцию — световую, акустическую и аудиовизуальную [4].

К настоящему времени имеются многочисленные данные об успешном применении методов неинвазивной стимуляции мозга, активирующих процессы нейропластичности, при коррекции нарушенных когнитивных функций. Цель данной работы состоит в анализе публикаций последних 5 лет и рассмотрении эффектов используемых неинвазивных воздействий в зависимости от условий и параметров их организации.

Поиск литературы для анализа проводили в базах данных eLIBRARY и PubMed/MEDLINE по ключевым словам: closed-loop non-invasive brain stimulation (неинвазивная стимуляция мозга с замкнутым контуром), neuroplasticity (нейропластичность) и cognitive rehabilitation (когнитивная реабилитация). Проанализированы примеры успешного применения неинвазивной стимуляции мозга с наличием и отсутствием обратной связи от собственных биоэлектрических характеристик пациента, а также с использованием предварительной активации процессов нейропластичности с помощью прайминга. Представлены результаты собственных исследований, демонстрирующие возможности восстановления нарушенных когнитивных функций с помощью ЭЭГ-управляемой светомузыкальной стимуляции.

Неинвазивная стимуляция, индукция нейропластичности и коррекция когнитивных нарушений

В когнитивной нейронауке и в современных клинических исследованиях успешно используются транскраниальные магнитные и электрические воздействия. Это обусловлено их способностью через механизмы нейропластичности эффективно и безопасно модулировать активность стимулируемой области мозга и нейронных сетей. Благодаря этой способности открывается возможность уточнения роли отдельных участков коры головного мозга в обеспечении восприятия, памяти, внимания, речи и других когнитивных функций, а также коррекции выявленных когнитивных нарушений [5].

Благодаря вовлечению механизмов нейропластичности значительное усиление когнитивных функций достигнуто при использовании транскраниальной магнитной стимуляции

(ТМС) с частотой тета-ритма ЭЭГ [6]. Ритмическая ТМС оказалась эффективным средством терапии когнитивных расстройств у пациентов с рассеянным склерозом [7]. Исследователи утверждают, что когнитивная реабилитация больных, являясь единственным подходом с доказанной эффективностью, может успешно осуществляться путём оптимизации параметров неинвазивной нейромодуляции с использованием транскраниальной стимуляции постоянным током или ТМС [7].

Эффективным средством усиления когнитивных функций через активацию процессов нейропластичности является также оптическая стимуляция. Так, показано, что уровень выполнения мнестических задач на фоне фотостимуляции с частотой 10 Гц оказывается существенно более высоким, чем без фоновых световых вспышек [8]. Авторы считают, что ритмическая оптическая стимуляция может успешно использоваться для улучшения когнитивных функций пациентов неврологической клиники.

В последние годы большую популярность и интенсивное развитие приобретают методы неинвазивной стимуляции мозга с замкнутым (closed-loop) контуром, при котором сигналы обратной связи от текущих физиологических параметров человека управляют стимуляцией [9]. Так, после сеанса транскраниальной электрической стимуляции (ТЭС), модулируемой медленноволновыми компонентами ЭЭГ, зарегистрировано значительное усиление процессов консолидации памяти, которое проявилось в улучшении узнавания и воспроизведения информации [10]. Высокоэффективным средством терапии когнитивных расстройств при многих заболеваниях является также метод, сочетающий ритмическую ТМС с регистрацией многоканальной ЭЭГ [11]. Позволяя оценивать возбудимость и взаимодействие различных областей коры между собой, он даёт возможность совершенствовать терапевтические подходы к коррекции многих когнитивных нарушений через оптимизацию параметров стимуляции.

Популярным вариантом неинвазивной стимуляции мозга с обратной связью, обеспечивающим оптимальное вовлечение процессов нейропластичности, является компьютерное преобразование текущих параметров ЭЭГ в лечебные сенсорные воздействия. Позитивные эффекты таких ЭЭГ-управляемых лечебных процедур продемонстрированы в ряде работ. Так, успешная коррекция функционального состояния и когнитивных функций была достигнута при световых ритмических воздействиях, автоматически

формируемых в реальном времени на основе оцифрованных значений текущей ЭЭГ [12]. Метод биоакустической коррекции, который состоит в предъявлении человеку акустических сигналов, получаемых путём компьютерного преобразования текущей ЭЭГ, был успешно использован для восстановления исполнительских функций, восприятия, чтения и устного счёта у пациентов с очаговыми поражениями головного мозга [13] и при когнитивной реабилитации пациентов с последствиями преходящих цереброваскулярных нарушений [14]. Известно также, что при предъявлении акустических стимулов, генерируемых в реальном времени программно-управляемой трансформацией доминирующих ритмов ЭЭГ субъекта в звуковой ряд, регистрируется клинически значимое уменьшение симптомов посттравматического стресса и улучшение когнитивных функций [15]. Позитивные результаты ЭЭГ-управляемых акустических воздействий авторы объясняют online обновлением собственных ЭЭГ-паттернов и резонансом между слышимыми акустическими сигналами и осцилляторными мозговыми сетями, что предоставляет организму возможность автокалибровки, релаксации и преодоления устойчивых патологических состояний.

Прайминг как индуктор нейропластичности

Прайминг, или эффект предшествования заключается в использовании предшествующего неинвазивного воздействия, которое через механизмы возбудимости и нейропластичности модулирует эффект последующей стимуляции [16]. Данные литературы о прайминг-эффектах противоречивы, поэтому представляется важным рассмотреть позитивные результаты его применения, которые могут способствовать дальнейшему совершенствованию технологий когнитивной реабилитации.

В качестве прайминга широко используются транскраниальные магнитные и электрические воздействия. Так, показано, что у пациентов с устойчивой к медикаментозной терапии депрессией, сопровождаемой когнитивными нарушениями, позитивный лечебный эффект достигается всего за один сеанс с помощью предварительной ритмической ТМС с частотой альфа-ритма ЭЭГ [17]. Успешная индукция нервной возбудимости и нейропластичности, сопровождаемая улучшением когнитивных функций, была достигнута при сочетании ТЭС переменным током с ТМС [18].

Транскраниальная стимуляция переменным током в сочетании с акустической стимуляцией

(тон 40 Гц) оказалась безопасным и легко переносимым методом коррекции когнитивных функций у пациентов с болезнью Альцгеймера, причём раздельное применение электрической и акустической стимуляции было значительно менее эффективным [19]. Для восстановления двигательных и когнитивных функций, нарушенных в результате различных повреждений и травм, может эффективно использоваться акустический прайминг как средство индукции нейропластичности. При этом могут успешно применяться сочетания громкого звука с ТМС [20].

Для индукции нейропластичности и реактивности коры в качестве преднастройки успешно используются разные виды сенсорной стимуляции с быстро изменяющейся частотой. Например, эффективным праймингом может служить последовательность быстро повторяющихся слуховых или зрительных стимулов, т. е. тетаническая стимуляция [21]. Такой прайминг, по утверждению исследователей, может служить диагностическим и лечебным инструментом в клинических условиях. В качестве средства индукции нейропластичности предлагается также использовать короткие серии световых воздействий в широком диапазоне частот, или Chirp-стимуляцию [22], а также четырёхимпульсную стимуляцию, где один разряд включает 4 коротких монофазных импульса и подаётся каждые 5 с в течение 30 мин [23].

В исследованиях для оценки зрелости корковой ритмики у младших школьников мы также использовали стимуляцию с быстро изменяющейся частотой, которая получила название "резонансное сканирование" [24]. Приём резонансного сканирования заключается в анализе ЭЭГ при светодиодной фотостимуляции с пошагово возрастающей частотой в пределах основных ритмов ЭЭГ. Было показано, что резонансное сканирование позволяет идентифицировать посредством резонанса тонкую структуру индивидуального спектра ЭЭГ, выявляя за счёт активации механизмов нейропластичности потенциальные резонансно-активные узкочастотные осцилляторы мозга. Эти данные позволили считать резонансное сканирование оптическим праймингом, способным повысить восприимчивость мозга к последующей стимуляции [25]. Важно отметить, что резонансное сканирование имеет очевидные преимущества по сравнению с перечисленными видами прайминга. Среди них динамичность, программно-управляемые цифровые параметры стимуляции и возможность резонансно активировать тонкую структуру индивидуального спектра ЭЭГ.

Восстановление нарушенных когнитивных функций с помощью ЭЭГ-управляемой светомузыкальной стимуляции

В наших исходных исследованиях для когнитивной реабилитации пожилых людей был использован приём преобразования параметров ЭЭГ субъекта в лечебные акустические воздействия [26]. С помощью специально разработанной программы текущие значения доминирующих у субъекта узкополосных спектральных ЭЭГ-компонентов (альфа-ЭЭГ-осцилляторов) трансформировались в музыкаподобные сигналы, по тембру напоминающие звуки флейты, плавно варьирующие по высоте тона и интенсивности. Было показано, что после сеанса прослушивания "музыки мозга" у пожилых людей регистрируются приросты мощности альфа-ритма ЭЭГ относительно фона, сопровождаемые ростом оценок самочувствия и настроения, а также улучшением когнитивных функций.

Впоследствии описанный метод ЭЭГ-управляемой музыкальной стимуляции был усовершенствован путём добавления второго контура обратной связи, в котором одновременно с музыкаподобной стимуляцией предъявляются световые ритмические воздействия, формируемые на основе нативной ЭЭГ пациента [27]. Созданный метод светомузыкальной стиму-

ляции с двойной обратной связью от ЭЭГ был успешно применён при когнитивной реабилитации пациентов с инсультом [28] и при устранении стресс-индуцированных рисков надёжности специалистов высокотехнологичного профиля [29]. При опросах все испытуемые позитивно оценивали проведённые экспериментальные сеансы, указывая, что "оригинальная музыка мозга" приятно дополнялась переливами разноцветного фона, воспринимаемыми через закрытые глаза.

Возможность увеличения эффективности ЭЭГ-управляемой светомузыкальной стимуляции была продемонстрирована при использовании описанного выше оптического прайминга в виде резонансного сканирования [30]. Испытуемыми были студенты университета в период экзаменационной сессии, которые находились в состоянии экзаменационного стресса и при исходном тестировании уровня запоминания слов демонстрировали когнитивные нарушения. Им предъявляли сочетания резонансного сканирования с ЭЭГ-управляемой светомузыкальной стимуляцией. Выяснилось, что предварительное резонансное сканирование может служить своеобразной преднастройкой мозга, вызывая активацию потенциальных резонаторов в спектре ЭЭГ и через механизмы нейропластичности

Динамика развития исследований, успешно использующих неинвазивную стимуляцию мозга для активации процессов нейропластичности при коррекции когнитивных нарушений

Условие/эффект исследования	Вид воздействия	Публикация
Устранение когнитивных нарушений при депрессии	ТМС	[17]
Усиление когнитивного контроля при стрессе	ЭЭГ-управляемая акустическая стимуляция	[15]
Индукция возбудимости и нейропластичности	ТМС + ТЭС	[18]
Усиление консолидации памяти	ЭЭГ-управляемая ТЭС	[10]
Усиление когнитивного контроля при стрессе	ЭЭГ-управляемая фотостимуляция	[12]
Восстановление когнитивных функций	ЭЭГ-управляемая акустическая стимуляция	[13]
Когнитивная реабилитация пожилых людей	ЭЭГ-управляемая музыкаподобная стимуляция	[26]
Терапия когнитивных расстройств	ЭЭГ-контролируемая ТМС	[11]
Когнитивная реабилитация после инсульта	ЭЭГ-управляемая светомузыкальная стимуляция	[28]
Восстановление когнитивных функций	ТМС тета-вспышками	[6]
Восстановление когнитивных функций	ЭЭГ-управляемая акустическая стимуляция	[14]
Когнитивная реабилитация специалиста	ЭЭГ-управляемая светомузыкальная стимуляция	[29]
Улучшение выполнения мнестических задач	Фотостимуляция с частотой 10 Гц	[8]
Терапия когнитивных расстройств	Ритмическая ТМС	[7]
Когнитивная реабилитация при болезни Альцгеймера	ТЭС переменным током + тон 40 Гц	[19]
Восстановление когнитивных функций	Акустическая стимуляция + ТМС	[20]
Когнитивная реабилитация студентов университета	ЭЭГ-управляемая светомузыкальная стимуляция	[30]

увеличивая реакции мозга на последующую ЭЭГ-управляемую светомузыкальную стимуляцию. В результате проведённых лечебных сеансов у студентов достоверно увеличивались мощности ЭЭГ-ритмов, особенно альфа-диапазона, а также значимо возрастали субъективные показатели состояния и когнитивной деятельности.

Таким образом, методы неинвазивной стимуляции мозга, активирующие процессы нейропластичности, интенсивно развиваются и успешно используются для коррекции нарушенных когнитивных функций, особенно в последние годы (таблица). И диапазон условий успешного вовлечения механизмов нейропластичности в процессы когнитивной реабилитации достаточно широк. Значительно варьируют также конкретные характеристики применяемых лечебных воздействий.

Заключение

Рассмотренные данные демонстрируют широкие возможности восстановления нарушенных когнитивных функций через вовлечение механизмов нейропластичности с помощью неинвазивной стимуляции мозга. Обилие публикаций по этой теме свидетельствует, что когнитивная реабилитация с использованием методов неинвазивной стимуляции мозга — это активно развивающееся и перспективное направление нейрофизиологии. Заслуживает внимания и использование прайминг-эффектов, которые позволяют увеличивать эффективность лечебных процедур за счёт предварительной индукции процессов нейропластичности. Наиболее перспективными представляются технологии, использующие автоматическую модуляцию неинвазивных сенсорных воздействий сигналами обратной связи от собственных ритмических процессов человека и в первую очередь от ритмических компонентов ЭЭГ. Такая обратная связь обеспечивает вовлечение не только механизмов нейропластичности, но и значимых для человека interoцептивных сигналов в процессы восстановления нарушенных когнитивных функций. Благодаря этим свойствам учитывается динамика микросостояний мозга, а лечебные процедуры являются персонализированными и эффективными. Автоматическое ЭЭГ-управление сенсорными воздействиями даёт возможность использовать эти технологии в условиях, не требующих осознанных усилий испытуемых и независимо от их мотивации. Указанные достоинства открывают перспективы для применения рассмотренных технологий в широком спектре реабилитационных мероприятий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 22-18-20075).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирадов М.А., Черникова Л.А., Супонева Н.А. Пластичность мозга и современные технологии нейрореабилитации // Вестник РАН. 2018. Т. 88, № 4. С. 299–312. doi: 10.7868/S0869587318040023
2. Ефимова М.Ю., Иванова Н.Е., Алексеева Т.М., Иванов А.Ю., Терешин А.Е., Поспелова М.Л. Патологические основы восстановления высших корковых функций // Современ. проблемы науки и образования. 2019. № 3. С. 183–193.
3. Гречко А.В., Шевцова Е.Е., Ковалева Г.А., Родионова А.Д. Вариативность применения методов сенсорной стимуляции в реабилитации пациентов с минимальными проявлениями сознания // Вестник восстановит. медицины. 2018. Т. 17, № 2. С. 129–135.
4. Polevaya S.A., Parin S.B., Fedotchev A.I. Current trends and prospects for development of non-invasive brain stimulation // Opera Med. Physiol. 2024. Vol. 11, N 1. С. 147–155. doi: 10.24412/2500-2295-2024-1-147-155
5. Бакулин И.С., Пойдашева А.Г., Медынцева А.А., Супонева Н.А., Пирадов М.А. Транскраниальная магнитная стимуляция в когнитивной нейронауке: методологические основы и безопасность // Рос. журн. когнитив. науки. 2020. Т. 7, № 3. С. 25–44. doi: 10.47010/20.3.2
6. Pabst A., Proksch S., Médé B., Comstock D.C., Ross J.M., Balasubramaniam R. A systematic review and meta-analysis of the efficacy of intermittent theta burst stimulation (iTBS) on cognitive enhancement // Neurosci. Biobehav. Rev. 2022. Vol. 135. ID 104587. doi: 10.1016/j.neubiorev.2022.104587
7. Забирова А.Х., Бакулин И.С., Пойдашева А.Г., Захарова М.Н., Супонева Н.А. Когнитивные нарушения и методы их терапии у пациентов с рассеянным склерозом // Альманах клин. медицины. 2023. Т. 51, № 2. С. 110–125. doi: 10.18786/2072-0505-2023-51-009
8. Каратыгин Н.А., Коробейникова И.И., Перцов С.С. Взаимосвязь результативности когнитивной деятельности и межполушарной асимметрии альфа-ритма ЭЭГ при латерализованном предъявлении визуальной информации на фоне оптической стимуляции // Бюл. эксп. биол. 2023. Т. 175, № 3. С. 268–272. doi: 10.47056/0365-9615-2023-175-3-268-272
9. Федотчев А.И. Методы адаптивной нейростимуляции с обратной связью: особенности, достижения и перспективы развития // Рос. физиол. журн. 2023. Т. 109, № 9. С. 1151–1166. doi: 10.31857/S0869813923090030

10. *Ketz N., Jones A.P., Bryant N.B., Clark V.P., Pilly P.K.* Closed-loop slow-wave tACS improves sleep-dependent long-term memory generalization by modulating endogenous oscillations // *J. Neurosci.* 2018. Vol. 38, N 33. P. 7314–7326. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0273-18.2018
11. *Пойдашева А.Г., Бакулин И.С., Лагода Д.Ю., Павлова Е.Л., Супонева Н.А., Пирадов М.А.* Транскраниальная электрическая стимуляция постоянным током с высоким разрешением (обзор литературы) // *Успехи физиол. наук.* 2021. Т. 52, № 1. С. 3–15. doi: 10.31857/S0301179821010070
12. *Федотчев А.И.* Эффекты фотостимуляции, управляемой электроэнцефалограммой человека // *Биофизика.* 2019. Т. 64, № 2. С. 358–361. doi: 10.1134/S0006302919020157
13. *Терешин А.Е., Кирьянова В.В., Константинов К.В., Решетник Д.А., Ефимова М.Ю., Карягина М.В., Савельева Е.К.* Биоакустическая коррекция в когнитивной реабилитации пациентов с очаговыми поражениями головного мозга // *Вестник восстановит. медицины.* 2019. № 5. С. 47–56.
14. *Щегольков А.М., Алехнович А.В., Тиммергазина Э.З., Дыбов М.Д., Массальский Р.И.* Влияние биоакустической коррекции на процесс медицинской реабилитации больных с последствиями преходящих цереброваскулярных нарушений (обзор) // *Госпитальная медицина: наука и практика.* 2022. Т. 5, № 4. С. 46–49. doi: 10.34852/GM3CVKG.2022.17.46.009
15. *Tegeler C.L., Gerdes L., Shaltout H.A., Cook J.F., Simpson S.L., Lee S.W., Tegeler C.H.* Successful use of closed-loop allostatic neurotechnology for post-traumatic stress symptoms in military personnel: self-reported and autonomic improvements // *Mil. Med. Res.* 2017. Vol. 4, N 1. ID 38. doi: 10.1186/s40779-017-0147-0
16. *Федотчев А.И.* О роли прайминга в развитии современных реабилитационных технологий // *Биофизика.* 2024. Т. 69, № 2. С. 399–403. doi: 10.31857/S0006302924020231
17. *Goldsworthy M.R., Vallence A.M., Yang R., Pitcher J.B., Ridding M.C.* Combined transcranial alternating current stimulation and continuous theta burst stimulation: a novel approach for neuroplasticity induction // *Eur. J. Neurosci.* 2016. Vol. 43, N 4. P. 572–529. doi: 10.1111/ejn.13142
18. *Hordacre B., Goldsworthy M.R., Vallence A.M., Darvishi S., Moezzi B., Hamada M., Rothwell J.C., Ridding M.C.* Variability in neural excitability and plasticity induction in the human cortex: A brain stimulation study // *Brain Stimul.* 2017. Vol. 10, N 3. P. 588–595. doi: 10.1016/j.brs.2016.12.001
19. *Liu Y., Liu S., Tang C., Tang K., Liu D., Chen M., Mao Z., Xia X.* Transcranial alternating current stimulation combined with sound stimulation improves cognitive function in patients with Alzheimer's disease: Study protocol for a randomized controlled trial // *Front. Aging Neurosci.* 2023. Vol. 14. ID 1068175. doi: 10.3389/fnagi.2022.1068175
20. *Germann M., Maffitt N.J., Poll A., Raditya M., Ting J.S.K., Baker S.N.* Pairing transcranial magnetic stimulation and loud sounds produces plastic changes in motor output // *J. Neurosci.* 2023. Vol. 43, N 14. P. 2469–2481. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0228-21.2022
21. *Sanders P.J., Thompson B., Corballis P.M., Maslin M., Searchfield G.D.* A review of plasticity induced by auditory and visual tetanic stimulation in humans // *Eur. J. Neurosci.* 2018. Vol. 48, N 4. P. 2084–2097. doi: 10.1111/ejn.14080
22. *Perenboom M.J., van de Ruit M., Zielman R., van den Maagdenberg A.M., Ferrari M.D., Carpay J.A., Tolner E.A.* Enhanced pre-ictal cortical responsivity in migraine patients assessed by visual chirp stimulation // *Cephalalgia.* 2020. Vol. 40, N 9. P. 913–923. doi: 10.1177/0333102420912725
23. *Matsumoto H., Ugawa Y.* Quadripulse stimulation (QPS) // *Exp. Brain Res.* 2020. Vol. 238, N 7–8. P. 1619–1625. doi: 10.1007/s00221-020-05788-w
24. *Савчук Л.В., Полевая С.А., Парин С.Б., Бондарь А.Т., Федотчев А.И.* Резонансное сканирование и анализ электроэнцефалограммы при определении зрелости корковой ритмики у младших школьников // *Биофизика.* 2022. Т. 67, № 2. С. 354–361. doi: 10.31857/S0006302922020181
25. *Fedotchev A.I., Parin S.B., Polevaya S.A.* Resonance scanning as an efficiency enhancer for EEG-guided adaptive neurostimulation // *Life (Basel).* 2023. Vol. 13, N 3. ID 620. doi: 10.3390/life13030620
26. *Федотчев А.И., Земляная А.А., Парин С.Б., Полевая С.А., Силантьева О.М.* Когнитивная реабилитация пожилых пациентов с помощью музыкального нейроинтерфейса // *Профилактическая медицина.* 2020. Т. 23, № 2. С. 42–46. doi: 10.17116/profmed20202302142
27. *Fedotchev A., Parin S., Polevaya S., Zemlianaia A.* EEG-based musical neurointerfaces in the correction of stress-induced states // *Brain Comput. Interfaces.* 2022. Vol. 9, N 1. P. 1–6. doi: 10.1080/2326263X.2021.1964874
28. *Mukhina E.A., Polevaya S.A., Parin S.B., Fedotchev A.I.* Cognitive rehabilitation of patients with acute cerebrovascular accident using EEG-guided adaptive neurostimulation // *Opera Med. Physiol.* 2021. Vol. 8, N 4. P. 90–96. doi: 10.24412/2500-2295-2021-4-90-96
29. *Федотчев А.И.* Технологии адаптивной нейростимуляции с обратной связью в когнитивной реабилитации специалиста // *СТМ.* 2022. Т. 14, № 4. С. 34–42. doi: 10.17691/stm2022.14.4.04
30. *Полевая С.А., Парин С.Б., Федотчев А.И.* Сочетание ЭЭГ-управляемой адаптивной нейростимуляции с резонансным сканированием в коррекции стрессиндуцированных состояний и когнитивной реабилитации студентов университета // *Бюл. экспер. биол.* 2023. Т. 175, № 6. С. 710–714. doi: 10.47056/0365-9615-2023-175-6-710-714