

# ЗАВИСЯЩАЯ ОТ СОСТОЯНИЯ МОЗГА НЕИНВАЗИВНАЯ НЕЙРОСТИМУЛЯЦИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ОТ ЭЭГ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ОБЗОР)

DOI: 10.17691/stm2023.15.5.04

УДК 616.831–073.7

Поступила 10.05.2023 г.

© **А.И. Федотчев**, д.б.н., ведущий научный сотрудник лаборатории механизмов регуляции биосистем<sup>1</sup>;  
**А.А. Земляная**, к.м.н., старший научный сотрудник отделения экзогенно-органических расстройств  
и эпилепсии<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт биофизики клетки РАН — обособленное подразделение  
Федерального исследовательского центра «Пушкинский научный центр  
биологических исследований РАН», ул. Институтская, 3, Пушкино, Московская область, 142290;

<sup>2</sup>Московский научно-исследовательский институт психиатрии — филиал  
Национального медицинского исследовательского центра психиатрии и наркологии  
им. В.П. Сербского Минздрава России, ул. Потешная, 3, кор. 10, Москва, 107076

Неинвазивная стимуляция мозга с обратной связью от электроэнцефалограммы (ЭЭГ) представляет собой интенсивно развивающуюся и перспективную область нейрофизиологии. В обзоре рассмотрены работы последних пяти лет о достижениях и перспективных направлениях дальнейшего развития этой линии исследований. Анализируются современные данные о разработанных подходах к практическому использованию разных видов зависящей от состояния мозга адаптивной нейростимуляции с обратной связью от ЭЭГ. Основное внимание уделено исследованиям с использованием неинвазивных магнитных и электрических воздействий, а также акустической и аудиовизуальной стимуляции. Рассмотрены возможности и перспективы применения этих технологий в клинической медицине. Представлены результаты собственных исследований авторов в данном направлении.

**Ключевые слова:** неинвазивная стимуляция мозга; электроэнцефалограмма; ЭЭГ; обратная связь; микросостояния мозга; ЭЭГ-управляемая адаптивная нейростимуляция; когнитивная реабилитация; коррекция функционального состояния.

**Как цитировать:** Fedotchev A.I., Zemlyanaya A.A. Brain state-dependent non-invasive neurostimulation with EEG feedback: achievements and prospects (review). *Sovremennyye tehnologii v medicine* 2023; 15(5): 33, <https://doi.org/10.17691/stm2023.15.5.04>

English

## Brain State-Dependent Non-Invasive Neurostimulation with EEG Feedback: Achievements and Prospects

**A.I. Fedotchev**, DSc, Leading Researcher, Laboratory of Biosystems Regulating Mechanisms<sup>1</sup>;  
**A.A. Zemlyanaya**, MD, PhD, Senior Researcher, Department of Exogenous and Organic Disorders  
and Epilepsy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Cell Biophysics of the Russian Academy of Sciences, 3 Institutskaya St., Pushchino,  
Moscow Region, 142290, Russia;

<sup>2</sup>Moscow Research Institute of Psychiatry — Branch of the Serbsky State Scientific Center for Psychiatry  
and Narcology of the Ministry of Health of Russia, Bldg. 10, 3 Poteshnaya St., Moscow, 107076, Russia

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

Non-invasive brain stimulation with electroencephalogram (EEG) feedback is an intensively developing and promising area of neurophysiology. The review considers the literature data over the past 5 years on the achievements and promising directions for the further development of this research line. Modern data on the developed approaches to the practical use of various types of brain state-dependent adaptive neurostimulation with EEG feedback were analyzed. The main attention is paid to the studies using non-invasive magnetic and electrical stimulation, as well as acoustic and audiovisual stimulation. The paper considers the possibilities and prospects for using these technologies in clinical medicine. The results of the authors' own research are presented.

**Key words:** non-invasive brain stimulation; electroencephalogram; EEG; feedback; brain microstates; EEG-controlled adaptive neurostimulation; cognitive rehabilitation; functional state correction.

## Введение

Разработка и клиническое применение неинвазивных методов стимуляции мозга — перспективная и интенсивно развивающаяся область нейрофизиологии, которая получила название «неинвазивная стимуляция мозга» (НИСМ). Наиболее развитыми методами НИСМ считаются транскраниальная магнитная стимуляция и транскраниальная электрическая стимуляция постоянным и переменным током [1–3], а также ритмические сенсорные воздействия (акустическая, видео- и аудиовизуальная стимуляция) [4–6]. С помощью методов НИСМ возможно достижение позитивных результатов при реабилитации пациентов неврологической клиники [7–12], при устранении когнитивных и стресс-индуцированных расстройств [13–18], при лечении психиатрических заболеваний [19–24] и при усилении когнитивных функций у здоровых людей [25–30].

Несмотря на интенсивное развитие и повышенный интерес исследователей, существующие методы НИСМ характеризуются рядом недостатков, таких как низкая эффективность, высокая вариабельность и слабая воспроизводимость полученных результатов [31–33]. Причиной отмеченных недостатков считается тот факт, что в стандартных методах НИСМ не учитывается динамическая природа эндогенной осцилляторной активности нервной системы и стимулы предъявляются во время разных физиологических микросостояний мозга, приводя к высокой вариабельности эффекта отдельных стимулов и к слабому суммарному эффекту стимуляции [34–36].

Для устранения указанных недостатков ряд авторов рекомендует применять протоколы зависимой от состояния мозга стимуляции с замкнутым контуром (closed-loop brain state-dependent neurostimulation), которые учитывают текущую динамику микросостояний мозга [37–40]. В качестве источника сигналов обратной связи оптимально использовать данные электроэнцефалограммы (ЭЭГ), регистрируемой в реальном времени [41–44]. Это обусловлено такими преимуществами ЭЭГ, как неинвазивность, высокое временное разрешение, простота применения и возможности извлечения данных в режиме реального времени [45–47]. Благодаря применению ЭЭГ-управляемых протоколов стимуляции методы НИСМ могут достигать высокой персонализации воздействий и открывают

возможность осуществления физиологически информированной адаптивной нейромодуляции [48–52].

За последние 5 лет количество исследований, посвященных эффектам применения зависимой от состояния мозга неинвазивной нейростимуляции с обратной связью от ЭЭГ, увеличилось экспоненциально. Обилие недавних публикаций и большое разнообразие конкретных экспериментальных подходов обуславливают необходимость обобщения литературных данных о достижениях и перспективных направлениях дальнейшего развития этой области неинвазивной стимуляции мозга. В связи с этим в представленном обзоре анализируются современные данные о разработанных подходах к практическому использованию разных видов зависящей от состояния мозга адаптивной нейростимуляции с обратной связью от ЭЭГ. Основное внимание уделено рассмотрению неинвазивных магнитных и электрических воздействий, а также акустической и аудиовизуальной стимуляции. Отдельно изучены возможности и перспективы использования таких технологий в клинической медицине. Представлены результаты собственных исследований авторов в этом направлении. Поиск литературы для анализа проводили в базе данных PubMed/MEDLINE по ключевым словам “closed-loop stimulation” (стимуляция с замкнутым контуром) и “adaptive neurostimulation” (адаптивная нейростимуляция).

## Достижения зависимой от состояния мозга неинвазивной нейростимуляции

К настоящему времени преимущества использования обратной связи от различных компонентов ЭЭГ при коррекции многих неблагоприятных функциональных состояний продемонстрированы в целом ряде работ. Одной из наиболее интенсивно развивающихся линий исследований является широкое внедрение принципа обратной связи от ЭЭГ в ранее используемые приемы регуляции сна у человека. Концептуальной основой данного направления послужили теоретические и методологические представления о том, что с помощью неинвазивных сенсорных воздействий, синхронизированных с определенными текущими параметрами ЭЭГ, возможно улучшать качество сна, усиливать когнитивные функции и процессы консолидации памяти [53–55]. В последние годы подобные эффекты продемонстрированы в экспери-

ментах с использованием разных ЭЭГ-управляемых сенсорных воздействий, таких как транскраниальная электрическая стимуляция [56–59], транскраниальная магнитная стимуляция [60–62] и акустическая стимуляция [63–65]. При этом успех был достигнут с применением самых разных параметров обратной связи от ЭЭГ: фазы определенного ЭЭГ-ритма [66, 67], мощности затылочного альфа-ритма [68, 69], медленно-волновых ЭЭГ-компонентов [70, 71] и сонных ЭЭГ-веретен [72].

ЭЭГ-управляемая акустическая стимуляция эффективно используется и в других клинических приложениях. Так, предъявление акустических стимулов, генерируемых в реальном времени программно-управляемой трансформацией доминирующих ритмов ЭЭГ-субъекта в звуковой ряд, вызывает клинически значимое уменьшение симптомов посттравматического стресса [73]. По мнению авторов [74], онлайн-обновление собственных ЭЭГ-паттернов и резонанс между слышимыми акустическими сигналами и осцилляторными мозговыми сетями предоставляют организму возможность автокалибровки, релаксации и преодоления устойчивых патологических состояний.

Еще один вариант ЭЭГ-управляемой акустической стимуляции успешно использован в методе биоакустической коррекции, который состоит в предъявлении человеку акустических сигналов, получаемых путем компьютерного преобразования текущей ЭЭГ. Показано, что метод позволяет «услышать» работу мозга в реальном времени и способен корректировать неблагоприятные функциональные состояния организма при нарушениях когнитивной и эмоционально-волевой сферы [75, 76].

Основу наших исходных исследований составила концепция «Музыка мозга пациента», согласно которой музыкально-терапевтические воздействия приобретают повышенную эффективность при условии их модуляции собственными параметрами ЭЭГ человека [77]. Разработан вариант метода ЭЭГ-управляемой акустической стимуляции в виде предъявлений классической музыки, громкость которой автоматически модулируется текущей амплитудой доминирующего у конкретного человека спектрального пика в диапазоне альфа-ритма ЭЭГ, или альфа-ЭЭГ-осциллятора [78, 79]. Этот метод был дополнен приемом компьютерного преобразования текущей амплитуды альфа-

ЭЭГ-осциллятора человека в музыкоподобные сигналы, которые по тембру напоминают звуки флейты и плавно варьируют по высоте тона и интенсивности [80]. Разработанные музыкальные нейроинтерфейсы успешно прошли апробацию при коррекции многих функциональных расстройств, а также при устранении рисков надежности специалиста [81] и при когнитивной реабилитации пожилых людей [82].

Впоследствии нами было показано, что выраженными позитивными эффектами характеризуются также световые ритмические воздействия, автоматически формируемые в реальном времени на основе оцифрованных значений текущей ЭЭГ [83]. В результате сочетания описанных подходов был разработан метод светомузыкальной адаптивной нейростимуляции с двойной обратной связью от ЭЭГ человека [84]. Метод заключается в одновременном предъявлении музыкоподобных стимулов, генерируемых на основе текущей амплитуды альфа-ЭЭГ-осциллятора пациента, и ритмических световых воздействий, формируемых на основе текущей ЭЭГ субъекта. Явными достоинствами этого метода являются высокая персонализация и эффективность лечебных воздействий благодаря использованию обратной связи от собственных биоэлектрических характеристик человека, вовлечение механизмов мультисенсорной интеграции, нейропластичности и резонансных механизмов мозга в процессы нормализации функционального состояния под влиянием стимуляционных процедур, а также автоматическое, без осознанных усилий пациента, управление лечебными сенсорными воздействиями, дающее возможность применять адаптивную нейростимуляцию для коррекции неблагоприятных сдвигов состояния у пациентов с измененным уровнем сознания, пожилых людей и детей [85, 86].

Благодаря перечисленным достоинствам с помощью метода ЭЭГ-управляемой светомузыкальной нейростимуляции были получены позитивные результаты при коррекции стресс-индуцированных состояний [87, 88], при оптимизации функционального состояния [89] и коррекции его неблагоприятных сдвигов [90, 91], при когнитивной реабилитации специалистов высокотехнологичного профиля [92], а также в клинических исследованиях при когнитивной реабилитации пациентов с инсультом [93] и при лечении посттравматического стресса и профессионального выгорания [94].

### Динамика развития неинвазивных методов ЭЭГ-управляемой нейростимуляции

Цель/эффект исследования	Вид воздействия	Параметр ЭЭГ-управления	Источник
Улучшение качества сна, усиление консолидации памяти	Транскраниальная электрическая стимуляция	Медленноволновые компоненты ЭЭГ	N. Ketz с соавт., 2018 [56]
Коррекция стресс-индуцированных состояний	Классическая музыка	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы	A. Fedotchev, 2018 [78]
Устранение стресс-вызванных рисков надежности специалиста	Классическая музыка	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы	A.И. Федотчев с соавт., 2018 [79]

Цель/эффект исследования	Вид воздействия	Параметр ЭЭГ-управления	Источник
Лечение посттравматического стресса	Акустические стимулы	Доминирующие ЭЭГ-ритмы	H.A. Shaltout с соавт., 2018 [73]
Коррекция функциональных расстройств	Музыкальная/музыкаподобная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы	A.A. Земляная с соавт., 2018 [80]
Улучшение качества сна, усиление когнитивного контроля	Транскраниальная электрическая стимуляция	Фаза ЭЭГ-ритма	F. Mansouri с соавт., 2018 [66], 2019 [57]
Улучшение качества сна, усиление консолидации памяти	Акустические стимулы	Сонные веретена на ЭЭГ	H.V. Ngo с соавт., 2019 [72]
Коррекция стресс-индуцированных состояний	Ритмическая световая стимуляция	Оцифрованная нативная ЭЭГ	A.И. Федотчев, 2019 [83]
Коррекция стресс-индуцированных состояний	ЭЭГ-управляемая светомузыкальная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы + нативная ЭЭГ	A.I. Fedotchev с соавт., 2019 [84]
Выявление маркеров нейродегенеративных заболеваний	Транскраниальная магнитная стимуляция	Вызванные потенциалы	A.Г. Пойдашева с соавт., 2019 [60]
Устранение рисков надежности специалиста	Музыкальная/музыкаподобная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы	A.И. Федотчев с соавт., 2019 [81]
Лечение посттравматического стресса	Акустические стимулы	Доминирующие ЭЭГ-ритмы	C.L. Tegeler с соавт., 2020 [74]
Когнитивная реабилитация пожилых людей	Музыкальная/музыкаподобная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы	A.И. Федотчев с соавт., 2020 [82]
Усиление когнитивных функций через индукцию нейропластичности	Транскраниальная электрическая стимуляция	Затылочный альфа-ритм ЭЭГ	G. Zarubin с соавт., 2020 [58]
Лечение депрессивных расстройств	Транскраниальная магнитная стимуляция	Альфа- и тета-ритмы ЭЭГ	B. Zrenner с соавт., 2020 [68]
Коррекция стресс-индуцированных состояний	Музыкальная/музыкаподобная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы	A.И. Федотчев, 2020 [87]
Улучшение качества сна, усиление консолидации памяти	Акустические стимулы	Медленноволновые компоненты ЭЭГ	J. Schneider с соавт., 2020 [70]
Усиление когнитивных и зрительных функций	Транскраниальная электрическая стимуляция	Теменной альфа-ритм ЭЭГ	H.I. Stecher с соавт., 2021 [69]
Оптимизация функционального состояния человека	ЭЭГ-управляемая светомузыкальная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы + нативная ЭЭГ	A.И. Федотчев с соавт., 2021 [89]
Когнитивная реабилитация пациентов с инсультом	ЭЭГ-управляемая светомузыкальная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы + нативная ЭЭГ	E.A. Mukhina с соавт., 2021 [93]
Усиление и уточнение процессов адаптивной нейромодуляции	Транскраниальная магнитная стимуляция	Фаза пиковых значений ЭЭГ-ритмов	S. Shirinpour с соавт., 2021 [67]
Лечение посттравматического стресса и выгорания	ЭЭГ-управляемая светомузыкальная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы + нативная ЭЭГ	A.I. Fedotchev с соавт., 2021 [94]
Биоакустическая коррекция состояния	ЭЭГ-управляемая акустическая стимуляция	Лобная и затылочная ЭЭГ	B.A. Иванова, E.A. Кормушкина, 2021 [75]
Коррекция негативных функциональных состояний	ЭЭГ-управляемая светомузыкальная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы + нативная ЭЭГ	A.И. Федотчев с соавт., 2021 [90]
Усиление эффектов при оптимизации параметров стимуляции	Транскраниальная электрическая стимуляция	Частота медленноволновых компонентов ЭЭГ	J. Ladenbauer с соавт., 2022 [59]
Лечение депрессивных расстройств	Транскраниальная магнитная стимуляция	Префронтальный альфа ритм ЭЭГ	J. Faller с соавт., 2022 [61]
Улучшение качества сна, усиление консолидации памяти	Акустические стимулы	Медленноволновые компоненты ЭЭГ	E. Debellemanière с соавт., 2022 [64]
Лечение постковидного синдрома	ЭЭГ-управляемая светомузыкальная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы + нативная ЭЭГ	S.A. Polevaya с соавт., 2022 [95]
Улучшение качества сна, усиление консолидации памяти	Акустические стимулы	Медленноволновые компоненты ЭЭГ	H.V. Ngo, B.P. Staresina, 2022 [63]



Цель/эффект исследования	Вид воздействия	Параметр ЭЭГ-управления	Источник
Усиление эффектов при учете фазы ЭЭГ	Транскраниальная магнитная стимуляция	Фаза затылочного альфа ритма ЭЭГ	Z. Ding с соавт., 2022 [62]
Биоакустическая коррекция состояния	ЭЭГ-управляемая акустическая стимуляция	Лобная и затылочная ЭЭГ	А.М. Щегольков с соавт., 2022 [76]
Улучшение качества сна, усиление консолидации памяти	Акустические стимулы	Медленноволновые компоненты ЭЭГ	S. Ruch с соавт., 2022 [71]
Когнитивная реабилитация специалиста	ЭЭГ-управляемая светомызыкальная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы + нативная ЭЭГ	A.I. Fedotchev, 2022 [92]
Улучшение качества сна, активизация автономных функций	Акустические стимулы	Доминирующие ЭЭГ-ритмы	C.L. Tegeler с соавт., 2023 [65]

Таким образом, диапазон условий успешного применения зависимой от состояния мозга ЭЭГ-управляемой нейростимуляции чрезвычайно широк, как и конкретные характеристики применяемых лечебных воздействий (см. таблицу). Количество исследований в данном направлении ежегодно возрастает, что свидетельствует о его перспективности.

### Перспективы зависимой от состояния мозга неинвазивной нейростимуляции

Интенсивное и успешное развитие зависимой от состояния мозга неинвазивной нейростимуляции определило многочисленные представления о перспективах использования данного метода. Отмечается, что устройства нейромодуляции, которые уже эффективно применяются для лечения двигательных расстройств, эпилепсии, боли, депрессии и других неврологических расстройств, к 2035 г. будут составлять основу неинвазивной нейротерапии за счет прогресса в понимании нейроанатомических сетей и механизмов действия нейростимуляции с обратной связью от высокоспецифичных биомаркеров, включая персонализированные характеристики ЭЭГ [96]. К настоящему времени при поиске высокоспецифичных ЭЭГ-биомаркеров продемонстрированы возможности использования многих индивидуальных ЭЭГ-характеристик, таких как короткие (50–100 мс) устойчивые микросостояния ЭЭГ в покое [97], межприступные спайки [98] и фаза медленной ЭЭГ-волны [99].

При рассмотрении перспектив развития зависимой от состояния мозга неинвазивной нейростимуляции важное место занимают исследования, направленные на совершенствование алгоритмов стимуляции мозга с обратной связью. Так, разработан надежный алгоритм адаптивной нейромодуляции, который способен аккуратно отслеживать траектории текущих состояний мозга для эффективного лечения заболеваний головного мозга и улучшения его функций [100]. Опубликовано руководство по электрофизиологической регистрации и стимуля-

ции мозга, которое дает возможность пользователю освоить анализ ЭЭГ-данных и настройку «на лету» параметров стимуляции в протоколах с обратной связью [101]. Так как естественные частоты нейронной активности могут служить точными целями ритмических стимуляционных воздействий [102–104], перспективной представляется методология оптимальной предварительной обработки ЭЭГ для повышения эффективности ЭЭГ-управляемой нейростимуляции [105].

Вопрос развития метода ЭЭГ-управляемой адаптивной нейростимуляции рассматривался в наших недавних исследованиях [84, 106]. Так как ЭЭГ-управляемая адаптивная нейростимуляция основана на автоматической модуляции сенсорных воздействий собственными ритмическими компонентами ЭЭГ человека, одним из возможных путей повышения ее эффективности может являться предварительное усиление модулирующего фактора, т.е. ЭЭГ субъекта. Для этого используют прием резонансного сканирования, который заключается в светодиодной фотостимуляции с пошагово увеличивающейся частотой в диапазоне тета-, альфа- и бета-ритмов ЭЭГ [107].

Показано, что предварительное резонансное сканирование значительно увеличивает эффективность ЭЭГ-управляемой адаптивной нейростимуляции при лечении постковидного синдрома [95] и при устранении последствий экзаменационного стресса у студентов университета [108]. При сочетании резонансного сканирования с ЭЭГ-управляемой адаптивной нейростимуляцией уже после однократных лечебных воздействий наблюдается рост мощности альфа-ритма ЭЭГ, сопровождаемый снижением уровня стресса, улучшением эмоционального состояния и показателей когнитивной деятельности за счет прогрессивного вовлечения резонансных и интеграционных механизмов мозга и механизмов нейропластичности. Сделан вывод, что разработанный комбинированный подход к нейростимуляции после дополнительных экспериментальных исследований может быть использован в реабилитационных

мероприятиях широкого профиля, при коррекции и реабилитации состояния специалистов экстремальных профессий, в образовательных учреждениях для активизации познавательной деятельности человека и процессов его обучения.

## Заключение

Зависящая от состояния мозга неинвазивная нейростимуляция с обратной связью от ЭЭГ представляет собой активно развивающееся и перспективное направление нейрофизиологии. Благодаря использованию управляющих сигналов от текущих параметров ЭЭГ такая неинвазивная стимуляция за счет учета динамики микросостояний мозга достигает высокой персонализации и эффективности лечебных воздействий.

Перспективной линией исследований представляется автоматическая модуляция сенсорных воздействий текущими параметрами ЭЭГ человека. Автоматическое управление лечебными сенсорными воздействиями дает возможность использовать ЭЭГ-управляемую адаптивную нейростимуляцию для коррекции неблагоприятных сдвигов состояния у пациентов с измененным уровнем сознания, пожилых людей и детей. Особенно перспективным является использование предварительного резонансного сканирования, которое вызывает активацию потенциальных резонаторов в спектре ЭЭГ и повышает реактивность мозга на последующую ЭЭГ-управляемую адаптивную нейростимуляцию. В результате сочетания экзогенных и эндогенных ритмических стимуляций позитивные психофизиологические эффекты регистрируются уже после однократного лечебного воздействия. Такой комбинированный подход к нейростимуляции может быть использован в широком спектре реабилитационных процедур.

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

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

## Литература/References

1. 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 физиологических наук* 2021; 52(1): 3–15, <https://doi.org/10.31857/s0301179821010070>.
2. Poydasheva A.G., Bakulin I.S., Lagoda D.Yu., Pavlova E.L., Suponeva N.A., Piradov M.A. High-definition transcranial direct current stimulation: a review. *Uspehi fiziologicheskikh nauk* 2021; 52(1): 3–15, <https://doi.org/10.31857/s0301179821010070>.
3. Bhattacharya A., Mrudula K., Sreepada S.S., Sathyaprabha T.N., Pal P.K., Chen R., Udupa K. An overview of noninvasive brain stimulation: basic principles and clinical applications. *Can J Neurol Sci* 2022; 49(4): 479–492, <https://doi.org/10.1017/cjn.2021.158>.
4. Linnhoff S., Koehler L., Haghikia A., Zaehle T. The therapeutic potential of non-invasive brain stimulation for the treatment of long-COVID-related cognitive fatigue. *Front Immunol* 2023; 13: 935614, <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.935614>.
5. Ghadiri A., Sturz D.L., Mohajerzad H. Associations between health education and mental health, burnout, and work engagement by application of audiovisual stimulation. *Int J Environ Res Public Health* 2022; 19(15): 9370, <https://doi.org/10.3390/ijerph19159370>.
6. 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; 14: 1068175, <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.1068175>.
7. Hu W., Zhang Z., Zhao H., Zhang L., Li L., Huang G., Liang Z. EEG microstate correlates of emotion dynamics and stimulation content during video watching. *Cereb Cortex* 2023; 33(3): 523–542, <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac082>.
8. Бакулин И.С., Пойдашева А.Г., Павлов Н.А., Супонева Н.А., Пирадов М.А., Афтanas Л.И. Транскраниальная электрическая стимуляция в улучшении функции руки при инсульте. *Успехи физиологических наук* 2019; 50(1): 90–104, <https://doi.org/10.1134/s030117981901003x>.
9. Bakulin I.S., Poydasheva A.G., Pavlov N.A., Suponeva N.A., Piradov M.A., Aftanas L.I. Transcranial current stimulation in poststroke hand paresis rehabilitation. *Uspehi fiziologicheskikh nauk* 2019; 50(1): 90–104, <https://doi.org/10.1134/s030117981901003x>.
10. Draaisma L.R., Wessel M.J., Hummel F.C. Non-invasive brain stimulation to enhance cognitive rehabilitation after stroke. *Neurosci Lett* 2020; 719: 133678, <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2018.06.047>.
11. De Luca R., Pollicino P., Rifici C., de Cola C., Billeri L., Marino S., Trifirò S., Fiumara E., Randazzo M., Bramanti P., Torrisi M. Improving motor and cognitive recovery following severe traumatic brain injury using advanced emotional audio-video stimulation: lessons from a case report. *Medicine (Baltimore)* 2021; 100(31): e26685, <https://doi.org/10.1097/md.00000000000026685>.
12. Zhang X., Huai Y., Wei Z., Yang W., Xie Q., Yi L. Non-invasive brain stimulation therapy on neurological symptoms in patients with multiple sclerosis: a network meta analysis. *Front Neurol* 2022; 13: 1007702, <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1007702>.
13. Hao W., Liu Y., Gao Y., Gong X., Ning Y. Transcranial direct current stimulation for the treatment of post-stroke depression: a systematic review. *Front Neurol* 2023; 13: 955209, <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.955209>.
14. Chino T., Kinoshita S., Abo M. Repetitive transcranial magnetic stimulation and rehabilitation therapy for upper limb hemiparesis in stroke patients: a narrative review. *Prog Rehabil Med* 2023; 8: 20230005, <https://doi.org/10.2490/prm.20230005>.
15. Korsakova-Kreyn M. Language of music and its psychophysical foundations (review). *Sovremennye tehnologii*

*v medicine* 2019; 11(1): 40, <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.04>.

14. 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. *Российский журнал когнитивной науки* 2020; 7(3): 25–44, <https://doi.org/10.47010/20.3.2>.

Bakulin I.S., Poydasheva A.G., Medyntsev A.A., Suponeva N.A., Piradov M.A. Transcranial magnetic stimulation in cognitive neuroscience: methodological basis and safety. *Rossiiskij zurnal kognitivnoj nauki* 2020; 7(3): 25–44, <https://doi.org/10.47010/20.3.2>.

15. Begemann M.J., Brand B.A., Ćurčić-Blake B., Aleman A., Sommer I.E. Efficacy of non-invasive brain stimulation on cognitive functioning in brain disorders: a meta-analysis. *Psychol Med* 2020; 50(15): 2465–2486, <https://doi.org/10.1017/s0033291720003670>.

16. Kan R.L.D., Zhang B.B.B., Zhang J.J.Q., Kranz G.S. Non-invasive brain stimulation for posttraumatic stress disorder: a systematic review and meta-analysis. *Transl Psychiatry* 2020; 10(1): 168, <https://doi.org/10.1038/s41398-020-0851-5>.

17. Jones K.T., Smith C.C., Gazzaley A., Zanto T.P. Research outside the laboratory: longitudinal at-home neurostimulation. *Behav Brain Res* 2022; 428: 113894, <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2022.113894>.

18. Wang Y., Xu N., Wang R., Zai W. Systematic review and network meta-analysis of effects of noninvasive brain stimulation on post-stroke cognitive impairment. *Front Neurosci* 2022; 16: 1082383, <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1082383>.

19. Buchanan D.M., Robaey P., D'Angiulli A. What do we know about transcranial direct current stimulation for major depression? *Brain Sci* 2020; 10(8): 480, <https://doi.org/10.3390/brainsci10080480>.

20. Gonsalvez I., Spagnolo P., Dworetzky B., Baslet G. Neurostimulation for the treatment of functional neurological disorder: a systematic review. *Epilepsy Behav Rep* 2021; 16: 100501, <https://doi.org/10.1016/j.ebr.2021.100501>.

21. Sprugnoli G., Rossi S., Rotenberg A., Pascual-Leone A., El-Fakhri G., Golby A.J., Santarnecchi E. Personalised, image-guided, noninvasive brain stimulation in gliomas: rationale, challenges and opportunities. *EBioMedicine* 2021; 70: 103514, <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2021.103514>.

22. Lee A.R.Y.B., Yau C.E., Mai A.S., Tan W.A., Ong B.S.Y., Yam N.E., Ho C.S.H. Transcranial alternating current stimulation and its effects on cognition and the treatment of psychiatric disorders: a systematic review and meta-analysis. *Ther Adv Chronic Dis* 2022; 13: 20406223221140390, <https://doi.org/10.1177/20406223221140390>.

23. Hyde J., Carr H., Kelley N., Seneviratne R., Reed C., Parlatini V., Garner M., Solmi M., Rosson S., Cortese S., Brandt V. Efficacy of neurostimulation across mental disorders: systematic review and meta-analysis of 208 randomized controlled trials. *Mol Psychiatry* 2022; 27(6): 2709–2719, <https://doi.org/10.1038/s41380-022-01524-8>.

24. Piccoli E., Cerioli M., Castiglioni M., Larini L., Scarpa C., Dell'Osso B. Recent innovations in non-invasive brain stimulation (NIBS) for the treatment of unipolar and bipolar depression: a narrative review. *Int Rev Psychiatry* 2022; 34(7–8): 715–726, <https://doi.org/10.1080/09540261.2022.2132137>.

25. Fisicaro F., Lanza G., Bella R., Pennisi M. “Self-

neuroenhancement”: the last frontier of noninvasive brain stimulation? *J Clin Neurol* 2020; 16(1): 158–159, <https://doi.org/10.3988/jcn.2020.16.1.158>.

26. Klink K., Paßmann S., Kasten F.H., Peter J. The modulation of cognitive performance with transcranial alternating current stimulation: a systematic review of frequency-specific effects. *Brain Sci* 2020; 10(12): 932, <https://doi.org/10.3390/brainsci10120932>.

27. Qu X., Wang Z., Cheng Y., Xue Q., Li Z., Li L., Feng L., Hartwigsen G., Chen L. Neuromodulatory effects of transcranial magnetic stimulation on language performance in healthy participants: systematic review and meta-analysis. *Front Hum Neurosci* 2022; 16: 1027446, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.1027446>.

28. Lee T.L., Lee H., Kang N. A meta-analysis showing improved cognitive performance in healthy young adults with transcranial alternating current stimulation. *NPJ Sci Learn* 2023; 8(1): 1, <https://doi.org/10.1038/s41539-022-00152-9>.

29. Bello U.M., Wang J., Park A.S.Y., Tan K.W.S., Cheung B.W.S., Thompson B., Cheong A.M.Y. Can visual cortex non-invasive brain stimulation improve normal visual function? A systematic review and meta-analysis. *Front Neurosci* 2023; 17: 1119200, <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1119200>.

30. Numssen O., van der Burght C.L., Hartwigsen G. Revisiting the focality of non-invasive brain stimulation — implications for studies of human cognition. *Neurosci Biobehav Rev* 2023; 149: 105154, <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2023.105154>.

31. Janssens S.E.W., Sack A.T. Spontaneous fluctuations in oscillatory brain state cause differences in transcranial magnetic stimulation effects within and between individuals. *Front Hum Neurosci* 2021; 15: 802244, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.802244>.

32. Antal A., Luber B., Brem A.K., Bikson M., Brunoni A.R., Cohen Kadosh R., Džurđević V., Fecteau S., Ferreri F., Flöel A., Hallett M., Hamilton R.H., Herrmann C.S., Lavidor M., Loo C., Lustenberger C., Machado S., Miniussi C., Moliadze V., Nitsche M.A., Rossi S., Rossini P.M., Santarnecchi E., Seeck M., Thut G., Turi Z., Ugawa Y., Venkatasubramanian G., Wenderoth N., Wexler A., Ziemann U., Paulus W. Non-invasive brain stimulation and neuroenhancement. *Clin Neurophysiol Pract* 2022; 7: 146–165, <https://doi.org/10.1016/j.cnp.2022.05.002>.

33. Schutter D.J.L.G., Smits F., Klaus J. Mind matters: a narrative review on affective state-dependency in non-invasive brain stimulation. *Int J Clin Health Psychol* 2023; 23(3): 100378, <https://doi.org/10.1016/j.ijchp.2023.100378>.

34. Zanos S. Closed-loop neuromodulation in physiological and translational research. *Cold Spring Harb Perspect Med* 2019; 9(11): a034314, <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a034314>.

35. Бакулин И.С., Пойдашева А.Г., Лагода Д.Ю., Супонева Н.А., Пирадов М.А. Перспективы развития терапевтической транскраниальной магнитной стимуляции. *Нервные болезни* 2021; 4: 3–10, <https://doi.org/10.24412/2226-0757-2021-12371>.

Bakulin I.S., Poydasheva A.G., Lagoda D.Yu., Suponeva N.A., Piradov M.A. Prospects for the development of therapeutic transcranial magnetic stimulation. *Nervnye bolezni* 2021; 4: 3–10, <https://doi.org/10.24412/2226-0757-2021-12371>.

36. Kasten F.H., Herrmann C.S. The hidden brain-state



- dynamics of tACS aftereffects. *Neuroimage* 2022; 264: 119713, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119713>.
37. Vosskuhl J., Strüber D., Herrmann C.S. Non-invasive brain stimulation: a paradigm shift in understanding brain oscillations. *Front Hum Neurosci* 2018; 12: 211, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00211>.
38. Jacob N.K., Kings H.O., Casson A.J. A smartphone based platform for portable non-invasive light and sound neuromodulation. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc* 2020; 2020: 5228–5231, <https://doi.org/10.1109/embc44109.2020.9175585>.
39. Belkacem A.N., Jamil N., Khalid S., Alhajjar F. On closed-loop brain stimulation systems for improving the quality of life of patients with neurological disorders. *Front Hum Neurosci* 2023; 17: 1085173, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1085173>.
40. Amiri M., Nazari S., Jafari A.H., Makkiabadi B. A new full closed-loop brain-machine interface approach based on neural activity: a study based on modeling and experimental studies. *Heliyon* 2023; 9(3): e13766, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13766>.
41. Bjekić J., Paunović D., Živanović M., Stanković M., Griskova-Bulanova I., Filipović S.R. Determining the individual theta frequency for associative memory targeted personalized transcranial brain stimulation. *J Pers Med* 2022; 12(9): 1367, <https://doi.org/10.3390/jpm12091367>.
42. Farkhondeh Tale Navi F., Heysieattalab S., Ramanathan D.S., Raoufy M.R., Nazari M.A. Closed-loop modulation of the self-regulating brain: a review on approaches, emerging paradigms, and experimental designs. *Neuroscience* 2022; 483: 104–126, <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2021.12.004>.
43. Pino O. A randomized controlled trial (RCT) to explore the effect of audio-visual entrainment among psychological disorders. *Acta Biomed* 2022; 92(6): e2021408, <https://doi.org/10.23750/abm.v92i6.12089>.
44. Tervo A.E., Nieminen J.O., Lioumis P., Metsomaa J., Souza V.H., Sinisalo H., Stenroos M., Sarvas J., Ilmoniemi R.J. Closed-loop optimization of transcranial magnetic stimulation with electroencephalography feedback. *Brain Stimul* 2022; 15(2): 523–531, <https://doi.org/10.1016/j.brs.2022.01.016>.
45. Bergmann T.O. Brain state-dependent brain stimulation. *Front Psychol* 2018; 9: 2108, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02108>.
46. Koenig T., Smailovic U., Jelic V. Past, present and future EEG in the clinical workup of dementias. *Psychiatry Res Neuroimaging* 2020; 306: 111182, <https://doi.org/10.1016/j.pscychresns.2020.111182>.
47. Jangwan N.S., Ashraf G.M., Ram V., Singh V., Alghamdi B.S., Abuzenadah A.M., Singh M.F. Brain augmentation and neuroscience technologies: current applications, challenges, ethics and future prospects. *Front Syst Neurosci* 2022; 16: 1000495, <https://doi.org/10.3389/fnsys.2022.1000495>.
48. Figuee M., Mayberg H. The future of personalized brain stimulation. *Nat Med* 2021; 27(2): 196–197, <https://doi.org/10.1038/s41591-021-01243-7>.
49. Grani F., Soto-Sánchez C., Fimia A., Fernández E. Toward a personalized closed-loop stimulation of the visual cortex: advances and challenges. *Front Cell Neurosci* 2022; 16: 1034270, <https://doi.org/10.3389/fncel.2022.1034270>.
50. Nasr K., Haslacher D., Dayan E., Censor N., Cohen L.G., Soekadar S.R. Breaking the boundaries of interacting with the human brain using adaptive closed-loop stimulation. *Prog Neurobiol* 2022; 216: 102311, <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2022.102311>.
51. Valençon N., Bouteiller Y., Jourde H.R., L'Heureux X., Sobral M., Coffey E.B.J., Beltrame G. The Portiloop: a deep learning-based open science tool for closed-loop brain stimulation. *PLoS One* 2022; 17(8): e0270696, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270696>.
52. Wendt K., Denison T., Foster G., Krinke L., Thomson A., Wilson S., Widge A.S. Physiologically informed neuromodulation. *J Neurol Sci* 2022; 434: 120121, <https://doi.org/10.1016/j.jns.2021.120121>.
53. Choi J., Kwon M., Jun S.C. A systematic review of closed-loop feedback techniques in sleep studies-related issues and future directions. *Sensors (Basel)* 2020; 20(10): 2770, <https://doi.org/10.3390/s20102770>.
54. Malkani R.G., Zee P.C. Brain stimulation for improving sleep and memory. *Sleep Med Clin* 2020; 15(1): 101–115, <https://doi.org/10.1016/j.jsmc.2019.11.002>.
55. Barnes C.M., Guarana C., Lee J., Kaur E. Using wearable technology (closed loop acoustic stimulation) to improve sleep quality and work outcomes. *J Appl Psychol* 2023; 108(8): 1391–1407, <https://doi.org/10.1037/apl0001077>.
56. 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; 38(33): 7314–7326, <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0273-18.2018>.
57. Mansouri F., Shanbour A., Mazza F., Fettes P., Zariffa J., Downar J. Effect of theta transcranial alternating current stimulation and phase-locked transcranial pulsed current stimulation on learning and cognitive control. *Front Neurosci* 2019; 13: 1181, <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01181>.
58. Zarubin G., Gundlach C., Nikulin V., Villringer A., Bogdan M. Transient amplitude modulation of alpha-band oscillations by short-time intermittent closed-loop tACS. *Front Hum Neurosci* 2020; 14: 366, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00366>.
59. Ladenbauer J., Khakimova L., Malinowski R., Obst D., Tönnies E., Antonenko D., Obermayer K., Hanna J., Flöel A. Towards optimization of oscillatory stimulation during sleep. *Neuromodulation* 2022; S1094-7159(22)00725-5, <https://doi.org/10.1016/j.neurom.2022.05.006>.
60. Пойдашева А.Г., Бакулин И.С., Легостаева Л.А., Супонева Н.А., Пирадов М.А. Метод ТМС-ЭЭГ: возможности и перспективы. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова* 2019; 69(3): 267–279, <https://doi.org/10.1134/s0044467719030092>.
61. Poydasheva A.G., Bakulin I.S., Legostaeva L.A., Suponeva N.A., Piradov M.A. TMS-EEG: current possibilities and future prospects. *Zurnal vysshej nervnoj deatel'nosti im. I.P. Pavlova* 2019; 69(3): 267–279, <https://doi.org/10.1134/s0044467719030092>.
62. Faller J., Doose J., Sun X., McIntosh J.R., Saber G.T., Lin Y., Teves J.B., Blankenship A., Huffman S., Goldman R.I., George M.S., Brown T.R., Sajda P. Daily prefrontal closed-loop repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) produces progressive EEG quasi-alpha phase entrainment in depressed adults. *Brain Stimul* 2022; 15(2): 458–471, <https://doi.org/10.1016/j.brs.2022.02.008>.
62. Ding Z., Wang Y., Li J., Li X. Closed-loop TMS-EEG



reactivity with occipital alpha-phase synchronized. *J Neural Eng* 2022; 19(5): 056027, <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac9432>.

63. Ngo H.V., Staresina B.P. Shaping overnight consolidation via slow-oscillation closed-loop targeted memory reactivation. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2022; 119(44): e2123428119, <https://doi.org/10.1073/pnas.2123428119>.

64. Debellemanière E., Pinaud C., Schneider J., Arnal P.J., Casson A.J., Chennaoui M., Galtier M., Navarrete M., Lewis P.A. Optimising sounds for the driving of sleep oscillations by closed-loop auditory stimulation. *J Sleep Res* 2022; 31(6): e13676, <https://doi.org/10.1111/jsr.13676>.

65. Tegeler C.L., Munger Clary H., Shaltout H.A., Simpson S.L., Gerdes L., Tegeler C.H. Cereset research standard operating procedures for insomnia: a randomized, controlled clinical trial. *Glob Adv Integr Med Health* 2023; 12: 27536130221147475, <https://doi.org/10.1177/27536130221147475>.

66. Mansouri F., Fettes P., Schulze L., Giacobbe P., Zariffa J., Downar J. A real-time phase-locking system for non-invasive brain stimulation. *Front Neurosci* 2018; 12: 877, <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00877>.

67. Shirinpour S., Alekseichuk I., Mantell K., Opitz A. Experimental evaluation of methods for real-time EEG phase-specific transcranial magnetic stimulation. *J Neural Eng* 2021; 17(4): 046002, <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab9dba>.

68. Zrenner B., Zrenner C., Gordon P.C., Belardinelli P., McDermott E.J., Soekadar S.R., Fallgatter A.J., Ziemann U., Müller-Dahlhaus F. Brain oscillation-synchronized stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex in depression using real-time EEG-triggered TMS. *Brain Stimul* 2020; 13(1): 197–205, <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.10.007>.

69. Stecher H.I., Notbohm A., Kasten F.H., Herrmann C.S. A comparison of closed loop vs. fixed frequency tACS on modulating brain oscillations and visual detection. *Front Hum Neurosci* 2021; 15: 661432, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.661432>.

70. Schneider J., Lewis P.A., Koester D., Born J., Ngo H.V. Susceptibility to auditory closed-loop stimulation of sleep slow oscillations changes with age. *Sleep* 2020; 43(12): zsa111, <https://doi.org/10.1093/sleep/zsa111>.

71. Ruch S., Schmidig F.J., Knüsel L., Henke K. Closed-loop modulation of local slow oscillations in human NREM sleep. *Neuroimage* 2022; 264: 119682, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119682>.

72. Ngo H.V., Seibold M., Boche D.C., Mölle M., Born J. Insights on auditory closed-loop stimulation targeting sleep spindles in slow oscillation up-states. *J Neurosci Methods* 2019; 316: 117–124, <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2018.09.006>.

73. Shaltout H.A., Lee S.W., Tegeler C.L., Hirsch J.R., Simpson S.L., Gerdes L., Tegeler C.H. Improvements in heart rate variability, baroreflex sensitivity, and sleep after use of closed-loop allostatic neurotechnology by a heterogeneous cohort. *Front Public Health* 2018; 6: 116, <https://doi.org/10.3389/fpubh.2018.00116>.

74. 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>.

75. Иванова В.А., Кормушкина Е.А. Применение метода биоакустической коррекции в реабилитации детей раннего возраста с расстройствами аутистического спектра. *Физическая и реабилитационная медицина* 2021; 3(1): 48–53, <https://doi.org/10.26211/2658-4522-2021-3-1-48-53>.

Ivanova V.A., Kormushkina E.A. Application of the method of bioacoustic correction in the rehabilitation of young children with autism spectrum disorders. *Fizicheskaya i reabilitacionnaya medicina* 2021; 3(1): 48–53, <https://doi.org/10.26211/2658-4522-2021-3-1-48-53>.

76. Щегольков А.М., Алехнович А.В., Тимергазина 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; 5(4): 46–49, <https://doi.org/10.34852/gm3cvkg.2022.17.46.009>.

Shchegolkov A.M., Alekhovich A.V., Timergazina E.Z., Dybov M.D., Massalsky R.I. Application of bioacoustic correction in medical rehabilitation of patients with consequences of transient disorders of cerebral circulation (literature review). *Gospital'naa medicina: nauka i praktika* 2022; 5(4): 46–49, <https://doi.org/10.34852/gm3cvkg.2022.17.46.009>.

77. Fedotchev A., Radchenko G., Zemlianaia A. Music of the brain approach to health protection. *J Integr Neurosci* 2018; 17(3): 291–294, <https://doi.org/10.31083/jin-170053>.

78. Fedotchev A. Stress coping via musical neurofeedback. *Adv Mind Body Med* 2018; 32(2): 17–20.

79. 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, <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2018-3-19-21>.

Fedotchev A.I., Polevaya 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, <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2018-3-19-21>.

80. Земляная А.А., Радченко Г.С., Федотчев А.И. Управляемые биопотенциалами мозга пациента музыкально-терапевтические воздействия в коррекции функциональных расстройств. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова* 2018; 118(3): 103–106, <https://doi.org/10.17116/jnevro201811831103-106>.

Zemlyanaya A.A., Radchenko G.S., Fedotchev A.I. Music therapy procedures controlled by the brain potentials in treatment of functional disorders. *Zhurnal nevrologii i psichiatrii im. S.S. Korsakova* 2018; 118(3): 103–106, <https://doi.org/10.17116/jnevro201811831103-106>.

81. Федотчев А.И., Крук В.М., Семикин Г.И. Функциональная надежность специалиста: современные риски и возможности их устранения. *Успехи физиологических наук* 2019; 50(3): 92–102, <https://doi.org/10.1134/s0301179819030044>.

Fedotchev A.I., Kruk V.M., Semikin G.I. Functional reliability of specialist: modern risks and possibilities for their elimination. *Uspehi fiziologicheskikh nauk* 2019; 50(3): 92–102, <https://doi.org/10.1134/s0301179819030044>.

82. Федотчев А.И., Земляная А.А., Парин С.Б., Полевая С.А., Силантьева О.М. Когнитивная реабилитация пожилых людей с помощью музыкального нейроинтерфейса. *Профилактическая медицина* 2020; 23(2): 42–46, <https://doi.org/10.17116/profmed20202302142>.

- Fedotchev A.I., Zemlianaia A.A., Parin S.B., Poleyaya S.A., Silantieva O.M. Cognitive rehabilitation of elderly patients using the musical neuro-interface. *Profylakticheskaya meditsina* 2020; 23(2): 42–46, <https://doi.org/10.17116/profmed20202302142>.
83. Федотчев А.И. Эффекты фотостимуляции, управляемой электроэнцефалограммой человека. *Биофизика* 2019; 64(2): 358–361, <https://doi.org/10.1134/s0006302919020157>.
- Fedotchev A.I. Human electroencephalogram-controlled effects of photostimulation. *Biofizika* 2019; 64(2): 358–361, <https://doi.org/10.1134/s0006302919020157>.
84. Fedotchev A.I., Zemlyanaya A.A., Savchuk L.V., Poleyaya S.A. Neurointerface with double feedback from subject's EEG for correction of stress-induced states. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2019; 11(1): 150, <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.17>.
85. Fedotchev A., Parin S., Poleyaya S., Zemlianaia A. Human body 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>.
86. Fedotchev A., Parin S., Poleyaya S., Zemlianaia A. EEG-based musical neurointerfaces in the correction of stress-induced states. *Brain Comput Interfaces* 2022; 9: 1–6, <https://doi.org/10.1080/2326263x.2021.1964874>.
87. Федотчев А.И. Музыкально-компьютерные технологии в разработке методов коррекции стресс-индуцированных состояний человека. *Проблемы музыкальной науки* 2020; 3: 24–29, <https://doi.org/10.33779/2587-6341.2020.3.024-029>.
- Fedotchev A.I. Musical-computer technologies in the development of methods for correcting stress-induced human conditions. *Problemy muzykalnoi nauki* 2020; 3: 24–29, <https://doi.org/10.33779/2587-6341.2020.3.024-029>.
88. Fedotchev A.I. Correction of stress-induced states using sensory stimulation automatically modulated by endogenous human rhythms. *Neurosci Behav Physiol* 2022; 52(6): 947–952, <https://doi.org/10.1007/s11055-022-01322-3>.
89. Федотчев А.И., Парин С.Б., Полевая С.А. Нейроинтерфейсы на основе эндогенных ритмов организма для оптимизации функционального состояния человека и его когнитивной реабилитации. *Успехи физиологических наук* 2021; 52(2): 83–92, <https://doi.org/10.31857/s030117982102003x>.
- Fedotchev A.I., Parin S.B., Poleyaya S.A. Neurointerfaces based on endogenous rhythms of the body to optimize the functional state of a person and his cognitive rehabilitation. *Uspehi fiziologicheskikh nauk* 2021; 52(2): 83–92, <https://doi.org/10.31857/s030117982102003x>.
90. Федотчев А.И., Парин С.Б., Полевая С.А. Принципы замкнутой петли обратной связи от эндогенных ритмов человека в современных технологиях нейробиоуправления и адаптивной нейростимуляции. *Биофизика* 2021; 66(2): 408–411, <https://doi.org/10.31857/s0006302921010216>.
- Fedotchev A.I., Parin S.B., Poleyaya S.A. The principle of a closed feedback loop of human endogenous rhythms in modern neurofeedback and adaptive neurostimulation technologies. *Biofizika* 2021; 66(2): 408–411, <https://doi.org/10.31857/s0006302921010216>.
91. Федотчев А.И., Бондарь А.Т. Адаптивная нейростимуляция, модулируемая собственными ритмическими процессами человека, в коррекции функциональных расстройств. *Физиология человека* 2022; 48(1): 124–129, <https://doi.org/10.31857/s0131164622010052>.
- Fedotchev A.I., Bondar A.T. Adaptive neurostimulation, modulated by person's own rhythmic processes, in the correction of functional disorders. *Fiziologiya cheloveka* 2022; 48(1): 124–129, <https://doi.org/10.31857/s0131164622010052>.
92. 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>.
93. Mukhina E.A., Poleyaya 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; 8(4): 90–96, <https://doi.org/10.24412/2500-2295-2021-4-90-96>.
94. Fedotchev A.I., Parin S.B., Poleyaya S.A. Adaptive neurostimulation methods in correcting posttraumatic stress disorder and professional burnout syndrome. *Opera Med Physiol* 2021; 8(2): 68–74, <https://doi.org/10.24412/2500-2295-2021-2-68-74>.
95. Poleyaya S.A., Parin S.B., Zemlyanaya A.A., Fedotchev A.I. Dynamics of EEG reactions under combination of resonance scanning and adaptive neurostimulation in patients with post-COVID syndrome. *Opera Med Physiol* 2022; 9(2): 103–109, <https://doi.org/10.24412/2500-2295-2022-2-103-109>.
96. Denison T., Morrell M.J. Neuromodulation in 2035: the neurology future forecasting series. *Neurology* 2022; 98(2): 65–72, <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000013061>.
97. de Bock R., Mackintosh A.J., Maier F., Borgwardt S., Riecher-Rössler A., Andreou C. EEG microstates as biomarker for psychosis in ultra-high-risk patients. *Transl Psychiatry* 2020; 10(1): 300, <https://doi.org/10.1038/s41398-020-00963-7>.
98. Holmes G.L. Interictal spikes as an EEG biomarker of cognitive impairment. *J Clin NeuroPhysiol* 2022; 39(2): 101–112, <https://doi.org/10.1097/wnp.0000000000000728>.
99. Zeller C.J., Züst M.A., Wunderlin M., Nissen C., Klöppel S. The promise of portable remote auditory stimulation tools to enhance slow-wave sleep and prevent cognitive decline. *J Sleep Res* 2023; 32(4): e13818, <https://doi.org/10.1111/jsr.13818>.
100. Fang H., Yang Y. Designing and validating a robust adaptive neuromodulation algorithm for closed-loop control of brain states. *J Neural Eng* 2022; 19(3): 036018, <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac7005>.
101. Hassan U., Pillen S., Zrenner C., Bergmann T.O. The Brain Electrophysiological recording & Stimulation (BEST) toolbox. *Brain Stimul* 2022; 15(1): 109–115, <https://doi.org/10.1016/j.brs.2021.11.017>.
102. Qiao J., Wang Y., Wang S. Natural frequencies of neural activities and cognitions may serve as precise targets of rhythmic interventions to the aging brain. *Front Aging Neurosci* 2022; 14: 988193, <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.988193>.
103. Zeng L., Guo M., Wu R., Luo Y., Wei P. The effects of electroencephalogram feature-based transcranial alternating current stimulation on working memory and electrophysiology. *Front Aging Neurosci* 2022; 14: 828377, <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.828377>.
104. Weiss E., Kann M., Wang Q. Neuromodulation of neural oscillations in health and disease. *Biology (Basel)* 2023; 12(3): 371, <https://doi.org/10.3390/biology12030371>.
105. Bigoni C., Cadic-Melchior A., Morishita T., Hummel F.C. Optimization of phase prediction for brain-state dependent stimulation: a grid-search approach. *J Neural Eng* 2023; 20(1): 016039, <https://doi.org/10.1088/1741-2552/acb1d8>.

**106.** Федотчев А.И. Коррекция стресс-индуцированных состояний сенсорными воздействиями, автоматически модулируемыми эндогенными ритмами человека. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова* 2022; 72(1): 3–10, <https://doi.org/10.31857/s0044467721060034>.

Fedotchev A.I. Correction of stress-induced states via sensory stimulation automatically modulated by human endogenous rhythms. *Zurnal vyssej nervnoj deatel'nosti im. I.P. Pavlova* 2022; 72(1): 3–10, <https://doi.org/10.31857/s0044467721060034>.

**107.** Савчук Л.В., Полевая С.А., Парин С.Б., Бондарь А.Т., Федотчев А.И. Резонансное сканирование и

анализ ЭЭГ при определении зрелости корковой ритмики у младших школьников. *Биофизика* 2022; 67(2): 354–361, <https://doi.org/10.31857/s0006302922020181>.

Savchuk L.V., Poleyaya S.A., Parin S.B., Bondar A.T., Fedotchev A.I. Resonance scanning and analysis of the electroencephalogram in determining the maturity of cortical rhythms in younger schoolchildren. *Biophysics* 2022; 67(2): 354–361, <https://doi.org/10.31857/s0006302922020181>.

**108.** Fedotchev A.I., Parin S.B., Poleyaya S.A. Resonance scanning as an efficiency enhancer for EEG-guided adaptive neurostimulation. *Life (Basel)* 2023; 13(3): 620, <https://doi.org/10.3390/life13030620>.