

УДК 612.821:612.822.3

## КОРРЕКЦИЯ СТРЕСС-ИНДУЦИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ СЕНСОРНЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ, АВТОМАТИЧЕСКИ МОДУЛИРУЕМЫМИ ЭНДОГЕННЫМИ РИТМАМИ ЧЕЛОВЕКА

© 2022 г. А. И. Федотчев<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Институт биофизики клетки РАН – обособленное подразделение ФГБУН  
ФИЦ “Пушкинский научный центр биологических исследований РАН”, Пушкино, Россия

\*e-mail: fedotchev@mail.ru

Поступила в редакцию 18.01.2021 г.

После доработки 29.03.2021 г.

Принята к публикации 26.04.2021 г.

Рассматривается динамика развития перспективного подхода к коррекции стресс-индуцированных состояний человека – адаптивной нейростимуляции. Подход заключается в предъявлении сенсорной стимуляции, автоматически модулируемой собственными ритмическими процессами человека, такими как ритм дыхания, ритм сердцебиений и ритмы электроэнцефалограммы (ЭЭГ). На многочисленных примерах показано, что самонастройка в реальном времени параметров стимуляции этими ритмами приводит к высокой персонализации лечебных воздействий и повышению их эффективности при подавлении стресс-индуцированных состояний. На основании рассмотренных публикаций обоснованы преимущества данного подхода при разработке инновационных технологий, использующих комплексную обратную связь от эндогенных ритмов человека для коррекции широкого спектра функциональных расстройств.

*Ключевые слова:* сенсорная стимуляция, замыкание обратной связи, автоматическая модуляция, ритмы ЭЭГ, ритм сердцебиений, ритм дыхания, самонастройка параметров стимуляции, коррекция функциональных расстройств

DOI: 10.31857/S0044467721060034

В современных условиях организм человека испытывает непрерывные воздействия острого и хронического стресса, которые приводят к формированию множественных стресс-индуцированных функциональных расстройств (Есин и др., 2020). При хроническом комплексном действии производственных, социальных и психоэмоциональных стрессовых факторов происходит нарушение механизмов адаптации, отказ защитных систем организма и развитие сначала стойких функциональных нарушений, а затем и серьезных болезней (Dillon et al., 2016). В кризисные периоды развития общества, характеризующиеся повышенными требованиями к мобилизации адаптационного потенциала и риском потери стабильного места работы, материального и социального статуса, разработка немедикаментозных методов своевременной коррекции функциональных нарушений, вызванных стрессом, считается особенно актуальной задачей (Леонова, 2016; Can et al., 2020).

В условиях пандемии COVID-19 особую тревогу специалистов вызывает рост таких стресс-вызванных расстройств, как посттравматическое стрессовое расстройство и синдром профессионального выгорания (Restauri, Sheridan, 2020). Значимыми стрессогенными факторами являются потенциальная опасность заражения вирусом, информационное освещение событий в СМИ, изменение привычного уклада жизни и экономические последствия эпидемии (Быховец, Коган-Лернер, 2020). Среди наиболее распространенных признаков посттравматического стрессового расстройства и профессионального выгорания выделяются такие, как психологическая дезадаптация и депрессия, субъективное ощущение беспомощности и тревожности, потеря трудовой мотивации и отрицательные переживания относительно результатов своего труда (Нагорнова, 2019; Петриков и др., 2020). Крайне важной в этих условиях является своевременная психотерапевтическая коррекция функциональ-

ных состояний, формируемых под влиянием стресса (Соловьева и др., 2020).

*Технологии нейробиоуправления в коррекции стресс-индуцированных расстройств*

Анализ литературы показывает, что наиболее разработанными средствами коррекции стресс-индуцированных расстройств являются технологии биоуправления с обратной связью, или нейробиоуправления. Показано, что они могут успешно применяться для преодоления повседневного стресса и тревожности (Kotozaki et al., 2014; Goessl et al., 2017), используются в комплексных программах управления стрессом (DeWitte et al., 2019), широко применяются при лечении посттравматических стрессовых расстройств (Chiba et al., 2019; Steingrimsson et al., 2020; Leem et al., 2020), а также синдрома профессионального выгорания (Reed et al., 2020; Kасem et al., 2020). В этих технологиях человеку предъявляются сенсорные стимулы (зрительные, слуховые, тактильные, электрические), отражающие текущую активность определенных нервных структур, которые лежат в основе его поведения или патологии (Pаро, 2019; Hampson et al., 2020). Замыкание сигналов обратной связи от собственных биоэлектрических потенциалов человека позволяет выявлять причинные взаимоотношения между мозговой активностью и поведением, обеспечивая такие преимущества технологий нейробиоуправления, как высокая персонализация лечебных процедур и возможность обучения осознанной регуляции физиологических функций, в норме регулируемых непроизвольно (Sitaram et al., 2017; Джос, Меньшикова, 2019).

Несмотря на отмеченные достоинства, существенный недостаток технологий нейробиоуправления заключается в том, что значительное число (до 30%) пациентов не могут обучиться навыку осознанной модификации собственных биопотенциалов для достижения требуемых лечебных эффектов, а остальные нуждаются в очень длительном обучении (Alkoby et al., 2017). Судя по недавним обзорам, данная “проблема необучаемости” обусловлена трудностью корректного декодирования мысленных команд и использованием неэффективных стратегий обучения (De Vico Fallani, Bassett, 2019), а также зависимостью успешности обучения от мотивации и настроения человека (Kadosh, Staunton, 2019).

Таким образом, в основе недостаточной эффективности технологий нейробиоуправления, использующих сенсорные сигналы обратной связи от собственных биопотенциалов человека для формирования навыка произвольной регуляции физиологических функций, лежат факторы, так или иначе связанные с необходимостью осознания и адекватного использования этих сигналов. Следовательно, для повышения эффективности нейроинтерфейсов требуются альтернативные подходы к организации обратной связи, исключая осознанную обработку предъявляемых сенсорных стимулов.

*От адаптивного биоуправления к адаптивной нейростимуляции: автоматическая модуляция сенсорной стимуляции ритмическими процессами человека*

Такой подход, позже получивший название “адаптивная нейростимуляция” (Zanos, 2019), был предложен в пионерских исследованиях Н.П. Бехтеревой, которая разработала методику прерывистой фотостимуляции человека в ритме собственных биопотенциалов его мозга (Бехтерева, Усов, 1960). Было показано, что ритмическая световая стимуляция, автоматически модулируемая электрическими сигналами мозга пациента, приводит к росту мощности альфа-ритма электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и является более эффективным видом функциональной нагрузки, чем обычные виды фотостимуляции. Говоря о преимуществах автоматической модуляции сенсорных воздействий собственными биопотенциалами мозга человека, Н.П. Бехтерева считала такие воздействия “очень щадящими, очень эффективными и аналогичными собственным защитным механизмам мозга и организма” (Бехтерева, 1990).

Впоследствии были теоретически обоснованы преимущества автоматической модуляции сенсорных воздействий не только ритмами ЭЭГ, но и другими ритмическими процессами человека, такими как ритм дыхания и ритм сердцебиений (Федотчев, 1996). Действительно, все эти ритмические процессы тесно взаимосвязаны и являются источником жизненно важных для человека interoцептивных сигналов (Gentsch et al., 2019; Gibson, 2019). Эндогенные ритмы составляют основу гомеостатической устойчивости и эффективности физиологических процессов (Riganello et al., 2019), участвуют в ритмическом облегчении сенсорной обработки (Haegens, Zion

**Таблица 1.** Развитие методов адаптивной нейростимуляции, успешно использующих автоматическую модуляцию сенсорной стимуляции ритмическими процессами человека для коррекции стресс-индуцированных состояний

**Table 1.** Development of adaptive neurostimulation methods that successfully use automatic modulation of sensory stimulation by human rhythmic processes to correct stress-induced states

Цель исследования	Модальность воздействий	Модулирующий ритм	Ссылка
Коррекция стресс-вызванных осложнений беременности	Классическая музыка	Тета-, альфа- и бета-ритмы ЭЭГ	Федотчев, Ким, 2009
Коррекция стресс-индуцированных состояний	Фиксированные частоты звука и света	Тета- и альфа-ЭЭГ- осцилляторы	Федотчев, Бондарь, 2008
Коррекция состояний тревоги и стресса	Музыкаподобная стимуляция	Ритмы сердца и дыхания	Cheung et al., 2016
Коррекция стресс-индуцированных состояний	Музыкаподобная стимуляция	Альфа-ЭЭГ- осцилляторы	Федотчев и др., 2016
Лечение посттравматического стресса	Акустические стимулы	Доминирующие ЭЭГ- ритмы	Tegeler et al., 2017
Лечение посттравматического стресса	Акустические стимулы	Доминирующие ЭЭГ- ритмы	Shaltout et al., 2018
Коррекция стресс-индуцированных состояний	Музыкаподобная стимуляция	Альфа-ЭЭГ-осцилляторы + ритм сердца	Федотчев и др., 2018
Коррекция стресс-индуцированных состояний	Ритмическая световая стимуляция	Нативная ЭЭГ	Федотчев, 2019
Коррекция стресс-индуцированных состояний	Музыкаподобная + ритмическая световая стимуляция	Альфа-ЭЭГ- осцилляторы + ритм сердца + нативная ЭЭГ	Федотчев и др., 2019
Лечение посттравматического стресса	Акустические стимулы	Доминирующие ЭЭГ- ритмы	Tegeler et al., 2020
Коррекция стресс-индуцированных состояний	Музыкаподобная + ритмическая световая стимуляция	Альфа-ЭЭГ- осцилляторы + ритм сердца + нативная ЭЭГ	Федотчев и др., 2020

Golumbic, 2018) и в процессах нейрореабилитации (Abiri et al., 2019). Поэтому автоматическая модуляция этими ритмами параметров сенсорных лечебных воздействий может сопровождаться выраженными физиологическими эффектами, которые обусловлены динамической самонастройкой сенсорной стимуляции на происходящие в организме человека физиологические изменения (Zhou, Miller, 2019; Fleming et al., 2020).

#### *Эффективность самонастройки стимуляции ритмическими процессами человека*

К настоящему времени преимущества использования автоматической обратной связи от эндогенных ритмов человека для эффективной коррекции стресс-индуцированных состояний продемонстрированы в целом ряде работ (табл. 1).

Так, например, для мониторинга и коррекции состояний тревоги и стресса разработан нейроинтерфейс “Биомузыка”, в кото-

ром текущие физиологические параметры организма преобразуются в музыкальные характеристики: электрокожная активность – в мелодию, температура кожи – в музыкальную тональность, частота сердечных сокращений – в звуки барабана, а ритм дыхания – в ритмичные акустические сигналы, напоминающие звуки при выдохе (Cheung et al., 2016). Показано также, что предъявление акустических стимулов, генерируемых в реальном времени программно-управляемой трансформацией доминирующих ритмов ЭЭГ субъекта в звуковой ряд, вызывает клинически значимое уменьшение симптомов посттравматического стресса (Tegeler et al., 2017; Shaltout et al., 2018). Авторы пришли к выводу, что быстрое обновление собственных ритмических паттернов и резонанс между слышимыми звуковыми сигналами и осцилляторными мозговыми сетями предоставляют организму возможность автокалибровки и самонастройки для достижения релаксации и преодо-

ния устойчивых патологических состояний (Tegeler et al., 2020).

В наших исходных исследованиях для коррекции стресс-индуцированных осложнений беременности были применены музыкальные воздействия, автоматически управляемые текущей амплитудой ЭЭГ-ритмов (Федотчев, Ким, 2009). Экспериментальной основой данной линии исследований явились многочисленные данные о том, что колебания электрической активности мозга способны синхронизироваться с временными закономерностями внешних воздействий и приводить к терапевтическому влиянию музыки на когнитивные или моторные симптомы (Laffont, Dalla Bella, 2018). Кроме того, известно, что музыкальная стимуляция обладает рядом когнитивных, психосоциальных и поведенческих достоинств, особенно для людей с неврологическими расстройствами, обеспечивая основу для разработки немедикаментозных методов лечения (Brancatisano et al., 2020). Однако из-за высокой гетерогенности использованных традиционных ритмов ЭЭГ (альфа-, тета-, бета-) положительные эффекты были достигнуты лишь после многочисленных лечебных сеансов. Был сделан вывод о необходимости использования значимых для субъекта узкочастотных спектральных компонентов его ЭЭГ (ЭЭГ-осцилляторов) вместо заранее задаваемых, излишне широкополосных традиционных ритмов ЭЭГ.

Данный подход был реализован при разработке метода двойной обратной связи от ЭЭГ-осцилляторов человека, предполагающего одновременную модуляцию звуковых и световых стимулов узкочастотными ритмическими компонентами спектра (ЭЭГ-осцилляторами) из тета- и альфа-диапазонов ЭЭГ, выявляемыми у каждого пациента в реальном времени (Федотчев, Бондарь, 2008). Благодаря автоматической настройке такой аудиовизуальной стимуляции на собственную ритмическую активность мозга человека существенная коррекция стрессогенных состояний была достигнута уже после применения 2–4 лечебных процедур.

Впоследствии был разработан проект “Музыка мозга”, в рамках которого была успешно доказана возможность подавления стресс-индуцированных состояний с помощью музыкальных или музыкалоподобных воздействий, автоматически модулируемых ЭЭГ-осцилляторами пациента. В данном проекте у каждого испытуемого определяется доминирую-

щий спектральный пик в диапазоне альфаритма ЭЭГ, или альфа-ЭЭГ-осциллятор. Его текущая амплитуда в ходе коррекционных процедур преобразуется компьютером в музыкалоподобные сигналы, которые по тембру напоминают звуки флейты и плавно варьируют по высоте тона и интенсивности (Федотчев и др., 2016).

В дальнейшем мы предположили, что эффективность музыкалоподобных воздействий может быть повышена, если они будут автоматически управляться не только ЭЭГ-осцилляторами пациента, но и ритмом его сердцебиений. Мы исходили из того, что биопотенциалы мозга и сердца являются источником interoцептивных сигналов, которые играют важную роль в поддержании оптимального физического, эмоционального и психического здоровья человека (Quadt et al., 2018; Добрушина и др., 2020), а их использование в процедурах биоуправления с обратной связью является “дорожной картой” в развитии нейротехнологий (Khalsa et al., 2018). Был разработан нейроинтерфейс, в котором музыкалоподобные сигналы, формируемые по описанным выше алгоритмам на основе ЭЭГ-осциллятора, дополняются слабыми щелчками, соответствующими частоте пульса испытуемого (Федотчев и др., 2018). Даже при однократном применении этого нейроинтерфейса у испытуемых, находящихся в состоянии напряжения и стресса, выявлены значимые позитивные сдвиги оценок самочувствия и настроения, а также уменьшение уровня эмоциональной дезадаптации.

Была также изучена возможность подавления стресс-индуцированных состояний с помощью световых ритмических воздействий, автоматически модулируемых собственной ЭЭГ человека. Такая организация воздействий достигалась путем нормирования оцифрованных значений текущей ЭЭГ, при котором наибольшая отрицательная величина ЭЭГ-сигнала соответствовала минимальной, а наибольшая положительная величина — максимальной интенсивности световой стимуляции. В строго контролируемых экспериментах установлено, что у испытуемых, находящихся в состоянии тревоги и стресса, достоверное увеличение мощности альфаритма ЭЭГ, снижение уровня стрессированности и позитивные сдвиги субъективных показателей наблюдаются только в случаях, когда автоматическая модуляция световой ритмической стимуляции осуществляется

непосредственно регистрируемой суммарной ЭЭГ человека (Федотчев, 2019). Был сделан вывод, что ключевую роль в наблюдаемых эффектах играют резонансные механизмы деятельности мозга, опосредующие взаимодействие эндогенных мозговых осцилляций с периодическими внешними воздействиями (Lefebvre et al., 2017).

Полученные данные послужили основой для разработки еще одного варианта музыкального нейроинтерфейса, в котором музыкальная стимуляция, формируемая на основе ритмических компонентов ЭЭГ и ритма сердцебиений человека, производится одновременно с предъявлением ритмических световых воздействий, управляемых суммарной ЭЭГ испытуемого. Проведена сравнительная оценка эффективности трех типов воздействий: контрольных, где обратная связь от ЭЭГ и сердца отсутствовала, музыкальных, управляемых ЭЭГ-осцилляторами и ритмом сердцебиений, и светомузыкальных, где музыкальные воздействия дополняются светодиодными мельканиями, формируемыми на основе суммарной ЭЭГ. В условиях такой комплексной обратной связи от биопотенциалов мозга и сердца выявлены достоверные позитивные эффекты в виде максимального роста мощности альфа-ритма ЭЭГ, увеличения оценок самочувствия и настроения, а также снижения уровня эмоциональной дезадаптации испытуемых уже после однократной лечебной процедуры (Федотчев и др., 2019). Кроме того, распрос испытуемых о субъективных ощущениях в ходе экспериментов выявил, что большинство обследуемых (75%) наиболее позитивно оценили воздействия с комплексной обратной связью от ЭЭГ и сердца, где музыкаподобные звуковые стимулы дополнялись приятными переливами разноцветного фона, возникающими при восприятии через закрытые глаза световых мельканий, формируемых на основе ЭЭГ. Физиологической основой зарегистрированных эффектов являются механизмы мультисенсорной интеграции (Roy et al., 2019) и механизмы нейропластичности (Пирадов и др., 2018; Воропаев и др., 2019; Нарышкин и др., 2020), вовлекаемые в процессы нормализации функционального состояния испытуемых под влиянием бисенсорных лечебных воздействий.

С целью более детального анализа возможных механизмов были проведены контролируемые исследования, в которых эффекты светомузыкальных воздействий, управляе-

мых собственными биопотенциалами мозга и сердца испытуемого, сравнивались с эффектами воздействий, модулируемых биопотенциалами мозга и сердца другого человека. Такой замысел исследования позволял исключить участие interoцептивных сигналов в случае управления светомузыкальными воздействиями чужими биопотенциалами мозга и сердца. Установлено, что только при светомузыкальной стимуляции, управляемой собственными биопотенциалами мозга и сердца испытуемых, наблюдается статистически значимый рост мощности основных ритмов ЭЭГ, сопровождаемый значимыми позитивными сдвигами показателей психологического тестирования и положительно-эмоциональными реакциями на воздействия (Федотчев и др., 2020). Полученные данные объясняются интеграцией процессов восприятия и обработки значимых для человека interoцептивных сигналов в резонансные механизмы ЦНС, обеспечивающие нормализацию функционального состояния под влиянием лечебных воздействий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные публикации показывают, что методы адаптивной нейростимуляции, использующие автоматическую модуляцию сенсорных воздействий эндогенными ритмами человека для коррекции стресс-индуцированных состояний, в последние годы демонстрируют интенсивное развитие. Судя по представленным данным, наибольшую эффективность демонстрируют методы, использующие бимодальную стимуляцию, автоматически модулируемую несколькими ритмическими процессами человека. Перспективность данного подхода определяется следующими отличительными особенностями:

- высокая персонализация через использование обратной связи от собственных биологических характеристик человека;
- вовлечение процессов восприятия и обработки значимых для человека interoцептивных сигналов в механизмы мультисенсорной интеграции, нейропластичности и резонансные механизмы мозга, обеспечивающие нормализацию функционального состояния под влиянием стимуляционных процедур;
- автоматическое, без осознанных усилий пациента, управление лечебными сенсорными воздействиями, дающее возможность использовать адаптивную нейростимуляцию для коррекции неблагоприятных сдвигов со-

стояния у пациентов с измененным уровнем сознания, пожилых людей и детей.

Благодаря этим особенностям разработанный подход может быть реализован в реабилитационных мероприятиях широкого профиля, в образовательных учреждениях для активизации познавательной деятельности человека и процессов его обучения, в военной и спортивной медицине, медицине катастроф, научных исследованиях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ № 19-013-00095.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бехтерева Н.П.* Электрическая стимуляция мозга и нервов у человека. Л.: Наука, 1990. 261 с.
- Бехтерева Н.П., Усов В.В.* Методика прерывистой фотостимуляции в ритме собственных потенциалов мозга при регистрации ЭЭГ. Физиологический журнал СССР. 1960. 46 (1): 108–111.
- Быховец Ю.В., Коган-Лернер Л.Б.* Пандемия COVID-19 как многофакторная психотравмирующая ситуация. Институт психологии РАН. Социальная и экономическая психология. 2020. 5 (2): 291–308.  
<https://doi.org/10.38098/ipran.sep.2020.18.2.010>
- Воропаев А.А., Иванова Г.Е., Котенко Н.В.* Применение неинвазивной нейромодуляции в реабилитации больных с травматической болезнью головного мозга. Вестник восстановительной медицины. 2019. 1 (89): 29–32.
- Джос Ю.С., Меньшикова И.А.* Возможности применения нейробиоуправления для повышения функциональных способностей головного мозга. Журнал медико-биологических исследований. 2019. 7 (3): 338–348.  
<https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2019.7.3.338>
- Добрушина О.Р., Добрынина Л.А., Арина Г.А., Кремнева Е.И., Суслина А.Д., Губанова М.В., Белопасова А.В., Солодчик П.О., Уразильдеева Г.Р., Кротенкова М.В.* Взаимосвязь interoцептивного восприятия и эмоционального интеллекта: функциональное нейровизуализационное исследование. Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2020. 70 (2): 206–216.  
<https://doi.org/10.31857/S0044467720020069>
- Есин Р.Г., Есин О.Р., Хакимова А.Р.* Стресс-индуцированные расстройства. Журн. неврол. психиатр. им. С.С. Корсакова. 2020. 120 (5): 131–137.  
<https://doi.org/10.17116/jnevro2020120051131>
- Леонова А.Б.* Комплексные психологические технологии управления стрессом и оценка индивидуальной стресс-резистентности: опыт интеграции различных исследовательских парадигм. Вестник Московского Университета. Серия 14. Психология. 2016. № 3: 63–72.
- Нагорнова А.Ю.* (отв. ред.). Стресс и эмоциональное выгорание: методы профилактики. Коллективная монография. Ульяновск: Зебра, 2019. 79 с.
- Нарышкин А.Г., Галанин И.В., Егоров А.Ю.* Управляемая нейропластичность. Физиология человека. 2020. 46 (2): 112–120.  
<https://doi.org/10.31857/S0131164620020101>
- Петриков С.С., Холмогорова А.Б., Суроегина А.Ю., Микита О.Ю., Рой А.П., Рахманина А.А.* Профессиональное выгорание, симптомы эмоционального неблагополучия и дистресса у медицинских работников во время эпидемии COVID-19. Консультативная психология и психотерапия. 2020. 28 (2): 8–45.  
<https://doi.org/10.17759/cpp.2020280202>
- Пирадов М.А., Черникова Л.А., Супонева Н.А.* Пластичность мозга и современные технологии нейрореабилитации. Вестник РАН. 2018. 88 (4): 299–312.  
<https://doi.org/10.7868/S0869587318040023>
- Соловьева Н.В., Макарова Е.В., Кичук И.В.* “Коронавирусный синдром”: профилактика психотравмы, вызванной COVID-19. Русский медицинский журнал. 2020. 28 (9): 18–22.
- Федотчев А.И.* Эндогенные ритмы организма как фактор модуляции параметров стимуляции. Биофизика. 1996. 41 (3): 718–721.
- Федотчев А.И.* Эффекты фотостимуляции, управляемой ЭЭГ человека. Биофизика. 2019. 64 (2): 358–361.  
<https://doi.org/10.1134/S0006302919020157>
- Федотчев А.И., Бондарь А.Т.* Метод двойной обратной связи от ЭЭГ осцилляторов пациента для коррекции стресс-вызванных функциональных расстройств Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2008. 58 (3): 376–381.
- Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Бахчина А.В., Григорьева В.Н., Катаев А.А., Парин С.Б., Полевая С.А., Радченко Г.С.* Трансформация ЭЭГ осцилляторов пациента в музыкоподобные сигналы при коррекции стресс-индуцированных функциональных состояний. Современные технологии в медицине. 2016. 8 (1): 93–98.  
<https://doi.org/10.17691/stm2016.8.2.01>
- Федотчев А.И., Журавлев Г.И., Ексина К.И., Силантьева О.М., Полевая С.А.* Оценка эффективности музыкального ЭЭГ нейроинтерфейса с дополнительным контуром управления от сердечного ритма. Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2018. 104 (1): 122–128.
- Федотчев А.И., Ким Е.В.* Особенности лечебных сеансов биоуправления с обратной связью по электроэнцефалограмме при нормальном и отягощенном протекании беременности. Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2009. 59 (4): 421–428.
- Федотчев А.И., Парин С.Б., Громов К.Н., Савчук Л.В., Полевая С.А.* Комплексная обратная связь от биопотенциалов мозга и сердца в коррекции стресс-индуцированных состояний. Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2019. 69

- (2): 187–193.  
<https://doi.org/10.1134/S0044467719020059>
- Федотчев А.И., Парин С.Б., Савчук Л.В., Полевая С.А.* Механизмы свето-музыкальной стимуляции, управляемой собственными или чужими биопотенциалами мозга и сердца. Современные технологии в медицине. 2020. 12 (4): 23–29.  
<https://doi.org/10.17691/stm2020.12.4.03>
- Abiri R., Borhani S., Sellers E.W., Jiang Y., Zhao X.* A comprehensive review of EEG-based brain-computer interface paradigms. *J. Neural. Eng.* 2019. 16: 011001.  
<https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaf12e>
- Alkoby O., Abu-Rmileh A., Shriki O., Todder D.* Can we predict who will respond to neurofeedback? A review of the inefficacy problem and existing predictors for successful EEG neurofeedback learning. *Neuroscience.* 2018. 378: 155–164.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.12.050>
- 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>
- Can Y.S., Iles-Smith H., Chalabianloo N., Ekiz D., Hernández-Alvarez J., Repetto C., Riva G., Ersoy C.* How to Relax in Stressful Situations: A Smart Stress Reduction System. *Healthcare (Basel).* 2020. 8 (2): 100.  
<https://doi.org/10.3390/healthcare8020100>
- Cheung S., Han E., Kushki A., Anagnostou E., Biddiss E.* Biomusic: An Auditory Interface for Detecting Physiological Indicators of Anxiety in Children. *Front. Neurosci.* 2016. 10: 401.  
<https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00401>
- Chiba T., Kanazawa T., Koizumi A., Ide K., Taschereau-Dumouchel V., Boku S., Hishimoto A., Shirakawa M., Sora I., Lau H., Yoneda H., Kawato M.* Current Status of Neurofeedback for Post-traumatic Stress Disorder: A Systematic Review and the Possibility of Decoded Neurofeedback. *Front. Hum. Neurosci.* 2019. 13: 233.  
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00233>
- De Vico Fallani F., Bassett D.S.* Network neuroscience for optimizing brain-computer interfaces. *Phys. Life Rev.* 2019. 31: 304–309.  
<https://doi.org/10.1016/j.plrev.2018.10.001>
- De Witte N.A.J., Buyck I., Van Daele T.* Combining Biofeedback with Stress Management Interventions: A Systematic Review of Physiological and Psychological Effects. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* 2019. 44 (2): 71–82.  
<https://doi.org/10.1007/s10484-018-09427-7>
- Dillon A., Kelly M., Robertson I.H., Robertson D.A.* Smartphone Applications Utilizing Biofeedback Can Aid Stress Reduction. *Front. Psychol.* 2016. 7 (832): 1–7.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00832>
- Fleming J.E., Orłowski J., Lowery M.M., Chaillet A.* Self-Tuning Deep Brain Stimulation Controller for Suppression of Beta Oscillations: Analytical Derivation and Numerical Validation. *Front. Neurosci.* 2020. 14: 639.  
<https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00639>
- Gentsch A., Sel A., Marshall A.C., Schütz-Bosbach S.* Affective interoceptive inference: Evidence from heart-beat evoked brain potentials. *Hum. Brain Mapp.* 2019. 40 (1): 20–33.  
<https://doi.org/10.1002/hbm.24352>
- Gibson J.* Mindfulness, Interoception, and the Body: A Contemporary Perspective. *Front. Psychol.* 2019. 10: 2012.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02012>
- Goessl V.C., Curtiss J.E., Hofmann S.G.* The effect of heart rate variability biofeedback training on stress and anxiety: a meta-analysis. *Psychol. Med.* 2017. 47 (15): 2578–2586.  
<https://doi.org/10.1017/S0033291717001003>
- 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>
- Hampson M., Ruiz S., Ushiba J.* Neurofeedback. *Neuroimage.* 2020. 218: 116473.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116473>
- Kadosh K.C., Staunton G.* A systematic review of the psychological factors that influence neurofeedback learning outcomes. *Neuroimage.* 2019. 185: 545–555.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.10.021>
- Khalsa S.S., Adolphs R., Cameron O.G., Critchley H.D., Davenport P.W., Feinstein J.S., Feusner J.D., Garfinkel S.N., Lane R.D., Mehling W.E., Meuret A.E., Nemeroff C.B., Oppenheimer S., Petzschner F.H., Pollatos O., Rhudy J.L., Schramm L.P., Simmons W.K., Stein M.B., Stephan K.E., Van den Bergh O., Van Diest I., von Leupoldt A., Paulus M.P.* Interoception and Mental Health: A Roadmap. *Biol. Psychiatry Cogn. Neurosci. Neuroimaging.* 2018. 3 (6): 501–513.  
<https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2017.12.004>
- Kacem I., Kahloul M., El Arem S., Ayachi S., Hafsia M., Maoua M., Ben Othmane M., El Maalel O., Hmida W., Bouallague O., Ben Abdesslem K., Naija W., Mrizek N.* Effects of music therapy on occupational stress and burn-out risk of operating room staff. *Libyan J. Med.* 2020. 15 (1): 1768024.  
<https://doi.org/10.1080/19932820.2020.1768024>
- Kotozaki Y., Takeuchi H., Sekiguchi A., Yamamoto Y., Shinada T., Araki T., Takahashi K., Taki Y., Ogino T., Kiguchi M., Kawashima R.* Biofeedback-based training for stress management in daily hassles: an intervention study. *Brain Behav.* 2014. 4 (4): 566–579.  
<https://doi.org/10.1002/brb3.241>
- 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>
- Leem J., Cheong M.J., Yoon S.H., Kim H., Jo H.G., Lee H., Kim J., Kim H.Y., Kim G.W., Kang H.W.* Neurofeedback self-regulating training in patients with Post traumatic stress disorder: A randomized

- controlled trial study protocol. *Integr. Med. Res.* 2020. 9 (4): 100464.  
<https://doi.org/10.1016/j.imr.2020.100464>
- Lefebvre J., Hutt A., Frohlich F.* Stochastic resonance mediates the state-dependent effect of periodic stimulation on cortical alpha oscillations. *Elife.* 2017. 6: e32054.  
<https://doi.org/10.7554/eLife.32054>
- Papo D.* Neurofeedback: Principles, appraisal, and outstanding issues. *Eur. J. Neurosci.* 2019. 49 (11): 1454–1469.  
<https://doi.org/10.1111/ejn.14312>
- 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>
- Reed K., Cochran K.L., Edelblute A., Manzanares D., Sinn H., Henry M., Moss M.* Creative Arts Therapy as a Potential Intervention to Prevent Burnout and Build Resilience in Health Care Professionals. *AACN Adv. Crit. Care.* 2020. 31 (2): 179–190.  
<https://doi.org/10.4037/aacnacc2020619>
- Restauri N., Sheridan A.D.* Burnout and Posttraumatic Stress Disorder in the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Pandemic: Intersection, Impact, and Interventions. *J. Am. Coll. Radiol.* 2020. 17 (7): 921–926.  
<https://doi.org/10.1016/j.jacr.2020.05.021>
- 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: 2336.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph16132336>
- Roy C., Dalla Bella S., Pla S., Lagarde J.* Multisensory integration and behavioral stability. *Psychol. Res.* 2021. 85 (2): 879–886.  
<https://doi.org/10.1007/s00426-019-01273-4>
- 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>
- Sitaram R., Ros T., Stoeckel L., Haller S., Scharnowski F., Lewis-Peacock J., Weiskopf N., Blefari M.L., Rana M., Oblak E., Birbaumer N., Sulzer J.* Closed-loop brain training: the science of neurofeedback. *Nat. Rev. Neurosci.* 2017. 18 (2): 86–100.  
<https://doi.org/10.1038/nrn.2016.164>
- Steingrimsson S., Bilonic G., Ekelund A.C., Larson T., Stadig I., Svensson M., Vukovic I.S., Wartenberg C., Wrede O., Bernhardsson S.* Electroencephalography-based neurofeedback as treatment for post-traumatic stress disorder: A systematic review and meta-analysis. *Eur. Psychiatry.* 2020. 63 (1): e7.  
<https://doi.org/10.1192/j.eurpsy.2019.7>
- Tegeler C.H., Cook J.F., Tegeler C.L., Hirsch J.R., Shaltout H.A., Simpson S.L., Fidali B.C., Gerdes L., Lee S.W.* Clinical, hemispheric, and autonomic changes associated with use of closed-loop, allostatic neurotechnology by a case series of individuals with self-reported symptoms of post-traumatic stress. *BMC Psychiatry.* 2017. 17: 141.  
<https://doi.org/10.1186/s12888-017-1299-x>
- 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. *Global Advances in Health and Medicine.* 2020. 9: 2164956120923288.  
<https://doi.org/10.1177/2164956120923288>
- 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>
- Zhou X., Miller J.P.* The Emerging Role of Biomarkers in Adaptive Modulation of Clinical Brain Stimulation. *Neurosurgery.* 2019. 85 (3): E440–E441.  
<https://doi.org/10.1093/neuros/nyz097>

## CORRECTION OF STRESS-INDUCED STATES VIA SENSORY STIMULATION AUTOMATICALLY MODULATED BY HUMAN ENDOGENOUS RHYTHMS

A. I. Fedotchev<sup>a,#</sup>

<sup>a</sup> Institute of Cell Biophysics, RAS, Pushchino, Russia

<sup>#</sup>e-mail: fedotchev@mail.ru

The development of a promising approach to the correction of stress-induced human states – adaptive neurostimulation – is considered. The approach consists in presenting sensory stimulation, automatically modulated by a person’s own rhythmic processes, such as breathing rhythm, heart rate and electroencephalogram (EEG) rhythms. Numerous examples have shown that real-time self-tuning of the parameters of stimulation by these rhythms leads to a high personalization of therapeutic effects and an increase of their effectiveness in suppressing stress-induced states. On the basis of the reviewed publications, the advantages of this approach in the development of innovative technologies that use complex feedback from human endogenous rhythms to correct a wide range of functional disorders are substantiated.

**Keywords:** sensory stimulation, closed-loop feedback, automatic modulation, EEG rhythms, heart rate, breathing rhythm, self-tuning of stimulation parameters, correction of functional disorders