

УДК 612.821:612.822.3

НЕЙРОИНТЕРФЕЙСЫ НА ОСНОВЕ ЭНДОГЕННЫХ РИТМОВ ОРГАНИЗМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЕГО КОГНИТИВНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

© 2021 г. А. И. Федотчев^{а, *}, С. Б. Парин^б, С. А. Полевая^с

^аИнститут биофизики клетки РАН – обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ “Пушкинский научный центр биологических исследований РАН”,
г. Пущино, Московской области, 142290 Россия

^бНижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, 603950 Россия

^сНижегородская государственная медицинская академия,
г. Нижний Новгород, 603005 Россия

*e-mail: fedotchev@mail.ru

Поступила в редакцию 03.08.2020 г.

После доработки 08.09.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

Представлен анализ исследований последних 5 лет по проблеме конструирования и управления в техногенных системах – нейроинтерфейсах и системах нейробиоуправления. Рассмотрены современные подходы к использованию нейроинтерфейсов в медицине, инженерной психологии и в когнитивной реабилитации человека. Основное внимание уделено нейроинтерфейсам, основанным на использовании системообразующих эндогенных ритмов организма – ритмов электроэнцефалограммы (ЭЭГ), ритма сердцебиений и ритма дыхания. Анализируются достоинства, состояние и проблемы данной линии исследований, намечаются перспективные пути решения ее ключевых вопросов. Представлены результаты собственных разработок авторов в этом направлении.

Ключевые слова: интерфейс мозг–компьютер, биоуправление с обратной связью, электроэнцефалограмма (ЭЭГ), системообразующие эндогенные ритмы, музыкальный нейроинтерфейс, коррекция состояний

DOI: 10.31857/S030117982102003X

1. ВВЕДЕНИЕ

Многие факторы современной жизни – острая актуальность проблемы образования, стремительное внедрение компьютерных и информационных технологий, необходимость переквалификации и освоения новых профессий, существенное повышение требований к надежности и безопасности деятельности специалиста – оказывают повышенную нагрузку на когнитивную сферу человека и диктуют необходимость ее совершенствования. Это происходит на фоне ежедневного стресса от конфликтных и экстремальных ситуаций, террористических актов, экономического кризиса, природных и техногенных катастроф, транспортных происшествий, насилия и других социальных явлений. Перечисленные факторы приводят к формированию множественных функциональных расстройств, а при комплексном хроническом воздействии – к отказу защитных систем организма и развитию серьезных болезней. Фармакологическая коррекция таких неблагопри-

ятных функциональных состояний может ухудшать когнитивные функции человека и часто сопровождается привыканием и побочными эффектами, что делает медикаментозный путь терапии не всегда возможным. Поэтому крайне востребованными являются нелекарственные средства системного воздействия, направленные на совершенствование когнитивной деятельности человека, а также на своевременную коррекцию психогенных функциональных нарушений и когнитивную реабилитацию специалиста.

В настоящее время безусловное лидерство в разработке таких средств принадлежит технологиям нейроинтерфейсов, включая интерфейсы мозг–компьютер (ИМК) и технологии биоуправления с обратной связью (БОС). ИМК представляют собой компьютерные информационно-управляющие системы, которые опосредуют сигнализацию между мозгом и различными технологическими устройствами, автоматически управляя исполнительными средствами

или модулируя параметры лечебных воздействий на основе собственных биофизических характеристик пациента [40, 91]. В технологиях БОС разнообразные биофизические характеристики организма человека преобразуются в информационные сигналы обратной связи для его обучения навыку произвольной регуляции различных функций [3, 55].

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к исследованиям в области технологий нейроинтерфейсов. Это нашло отражение в 2–3-кратном увеличении за последние 5 лет общего количества публикаций по ИМК и БОС в международной базе данных Pubmed. Такой экспоненциальный рост исследований обусловлен неэффективностью традиционных фармакологических подходов и бурным ростом вычислительных мощностей, робототехники, методов записи сигналов мозга и математических алгоритмов для их декодирования [7].

Обилие недавних публикаций и большое разнообразие конкретных приложений технологий ИМК и БОС делают необходимым обобщение литературных данных о современном состоянии и перспективных направлениях развития технологий нейроинтерфейсов. В связи с этим в представленном обзоре анализируются современные подходы к использованию нейроинтерфейсов в медицине, инженерной психологии и в когнитивной реабилитации человека. Основное внимание уделено рассмотрению нейроинтерфейсов, основанных на использовании системобразующих эндогенных ритмов организма — ритмов электроэнцефалограммы (ЭЭГ), ритма сердцебиений и ритма дыхания. Анализируются проблемы и перспективы развития технологий нейроинтерфейсов, представлены результаты собственных исследований авторов в этом направлении.

2. НЕЙРОИНТЕРФЕЙСЫ В РЕГУЛЯЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ ОРГАНИЗМА

Современные технические средства позволяют регистрировать параметры функционирования практически любой ткани или органа человека. Поэтому спектр используемых в технологиях ИМК и БОС параметров организма чрезвычайно широк — от электрических и вибротактильных характеристик мышц [51] и физических характеристик кожи [74] до температуры тела [90] и показателей гемодинамики [64].

Важным направлением развития технологий нейроинтерфейсов является использование в качестве сигнала обратной связи электрических потенциалов мышц, регистрируемых с помощью электромиограммы (ЭМГ). Поверхностная ЭМГ позволяет пациенту и врачу иметь прямой и непосредственный доступ к мышечной функции, что

невозможно при ручной пальпации или визуальном наблюдении [47, 75]. Целью таких нейроинтерфейсов является создание приспособлений для передвижения или общения пациентов, которые не могут двигаться и общаться с помощью обычных путей [28]. Такие подходы включают трансляцию записанных ЭМГ сигналов в команды навигации или выбора, что позволяет пользователю перемещаться в виртуальной или реальной среде или выбирать буквы, чтобы напечатать их для целей коммуникации. Получены положительные результаты применения ЭМГ-БОС для снижения нагрузки на мышцы и лечения хронических болей, формируемых при неправильной осанке во время набора текста на компьютере [46].

Нейроинтерфейсы, основанные на обратной связи от электрокожной активности, оказались эффективными для борьбы со стрессом у кризисных менеджеров [61] и коррекции психофизиологического состояния больных эпилепсией [65]. Для снижения стресса в современном обществе предложены нейроинтерфейсы, использующие игровые приложения для мобильных телефонов или смартфонов [41]. Авторы продемонстрировали перспективность сочетания смартфонных игровых приложений с процедурой БОС по электрической проводимости кожи в качестве инструмента для снижения стресса.

Рассмотренные примеры демонстрируют применимость современных подходов к созданию нейроинтерфейсов, использующих биоэлектрические процессы человека для направленной регуляции и оптимизации функций организма. Однако наиболее разработанным подходом является использование сигналов обратной связи от системобразующих ритмических процессов человека — ритмов его электроэнцефалограммы (ЭЭГ), ритма сердечных сокращений и ритма дыхания.

3. НЕЙРОИНТЕРФЕЙСЫ НА ОСНОВЕ ЭНДОГЕННЫХ РИТМОВ ЧЕЛОВЕКА

Организм человека представляет собой множество колебательных систем, объединенных прямыми и обратными связями в сложную, иерархически построенную структуру. Особую роль в этой структуре играют эндогенные ритмы основных жизнеобразующих систем организма — системы биопотенциалов мозга, отражаемых в ЭЭГ, сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Эти ритмические процессы тесно взаимосвязаны и составляют основу природной гомеостатической регуляции функций [2, 49, 52]. Они демонстрируют явления синхронизации и резонанса и характеризуются высокой чувствительностью к действию внешних факторов [56]. Благодаря этому даже низкоинтенсивные, но ритмически организованные сигналы при условии совпадения их частоты с эндогенными ритмами

организма могут сопровождаться выраженными физиологическими эффектами, обусловленными резонансными механизмами смены биологических состояний [76].

Перечисленные и другие свойства эндогенных ритмов обусловили широкое распространение и растущую популярность разнообразных нейроинтерфейсов, использующих сигналы обратной связи от этих физиологических параметров человека для восстановления нарушенных функций и его когнитивной реабилитации. Ниже будут рассмотрены примеры использования каждого из системообразующих ритмов организма в современных технологиях ИМК и БОС.

3.1. Нейроинтерфейсы на основе ритма сердечных сокращений

Частота сердечных сокращений является результатом собственного автоматизма синоатриального узла и модулирующего влияния вегетативной нервной системы, но может произвольно управляться человеком при наличии определенных условий. Наиболее распространенным средством направленной регуляции ритма сердцебиений и функционального состояния человека являются процедуры БОС, основанные на показателях вариабельности сердечного ритма (ВСР).

ВСР представляет собой небольшие изменения в промежутках времени между смежными сердечными сокращениями. При проведении процедур БОС в качестве управляемого параметра используются характеристики ВСР, которые определяются в результате спектрального анализа кардиоинтервалограмм [85]. Наиболее часто применяются такие показатели ВСР, как суммарная мощность спектра ВСР, мощность спектра ритмограмм в области низких и высоких частот, а также соотношение мощностей спектра ритмограмм в области низких и высоких частот, или коэффициент вегетативного баланса [12].

Биоуправление на основе показателей ВСР является активным когнитивным процессом поиска требуемой информации, выделения существенных признаков, сличения их между собой, что предполагает участие многих функциональных систем организма человека и формирование оптимальной для данного индивида функциональной организации корково-подкорковых взаимодействий [6]. Благодаря этим свойствам процедуры ВСР-БОС были успешно использованы для лечения наркозависимости [42], для устранения психотических расстройств [38] и для подавления состояний тревоги и стресса [39, 50].

Процедуры ВСР-БОС могут также способствовать увеличению когнитивной активности специалиста. Считается, что обратная связь от ритма сердцебиений может улучшать эмоцио-

нальное обучение и память [80]. Для когнитивной реабилитации пожилых людей предложен подход, сочетающий ВСР-БОС и движения рук в технологической системе, спроектированной на основе робота [67]. Авторы утверждают, что пожилые люди под влиянием лечебных процедур продемонстрировали увеличение когнитивной активности и высказали удовлетворение по поводу потребительских свойств предложенного устройства.

3.2. Нейроинтерфейсы на основе ритма дыхания

Использование ритма дыхания в нейроинтерфейсах основано на концепции, согласно которой дыхание через множественные сенсорные связи осуществляет значимое влияние на кортикальную активность [57, 58], а также на концепции кардиореспираторного синхронизма, предполагающей тесную взаимосвязь между деятельностью сердечно-сосудистой и дыхательной систем в регуляции физиологического статуса организма [81].

В качестве целевого параметра процедур респираторного БОС чаще всего используется такой показатель, как резонансное или замедленное дыхание [79, 88, 92]. В этих работах показано, что выработка устойчивого навыка спокойного диафрагмального дыхания с замедленным выдохом обеспечивают нормализацию баланса автономной нервной системы, улучшение работы дыхательной системы и общего самочувствия. В других работах процедуры БОС по обучению резонансному дыханию успешно использованы для лечения гипертонии [33], тревожности [62] и в спорте высоких достижений [53].

Ранее нами был разработан оригинальный нейроинтерфейс, в котором параметры обезболивающей электростимуляции управляются ритмом дыхания пациента [18]. В данном подходе использовали датчик дыхания, который крепился на груди человека и модулировал амплитуду электрических импульсов от обезболивающего нейростимулятора в строгом соответствии с ритмом дыхания обследуемого. Разработанный нейроинтерфейс был успешно применен для устранения рисков надежности специалистов высокотехнологичных видов деятельности, у которых в результате чрезмерного напряжения малых групп мышц при интенсивной работе на компьютере формировались стойкие болевые синдромы [44].

3.3. Нейроинтерфейсы на основе ЭЭГ

К настоящему времени наиболее широкое признание имеют технологии ИМК и БОС, использующие различные параметры электрической активности мозга в виде ЭЭГ. В основе этого лежит тот факт, что головной мозг человека явля-

ется органом, осуществляющим синтез информации, контроль и регуляцию всех функций организма [4, 9, 60]. Направленная модификация ритмической структуры биоэлектрических процессов с помощью нейроинтерфейсов вызывает нейропластические перестройки в заинтересованных структурах мозга, одновременно изменяя состояние и других систем организма — дыхательной, сердечно-сосудистой, иммунной, сенсомоторной и др., приводя к требуемым лечебным эффектам [82].

Применение технологий ИМК в нейрореабилитации — новая и бурно развивающаяся область исследований [11, 13]. Они позволяют человеку научиться управлять внешними исполнительными устройствами посредством произвольной модификации собственной ЭЭГ напрямую от мозга без привлечения в этот процесс нервов и мышц [5]. Это достоинство ИМК было успешно применено для реабилитации пациентов с выраженным гемипарезом вследствие очагового повреждения головного мозга [8, 27]. Авторы исходили из того, что воображение движений может стимулировать те же нейропластические механизмы мозга, что и их реальное исполнение [14]. В упомянутых работах использовался ИМК, который преобразует ЭЭГ-сигналы мозга, возникающие при воображении движения, в команды внешнему устройству.

Хотя вопросы разработки ИМК для нейрореабилитации занимают центральное место в современных исследованиях [35], в последнее время особый интерес вызывают возможности ИМК для усиления когнитивной активности специалиста [29, 72]. Отмечается, что современное состояние технологий ИМК позволяет ставить цели повышения производительности умственного труда и формирования лидерства у здоровых лиц [70], а также открывает возможности создания когнитивных ИМК [1].

Технологии БОС, основанные на ЭЭГ, также получили широкое признание как средства модуляции когнитивных функций и поведения человека [43, 86]. Обычно в процедурах ЭЭГ-БОС, которые в зарубежной литературе называются нейробиоуправлением (НБУ), используется тот или иной ЭЭГ ритм, текущая амплитуда которого отражается в параметрах звуковых или световых сигналов обратной связи, предъявляемых пациенту с целью произвольного контроля выраженности данных ритмических компонентов (волн) ЭЭГ для получения требуемых эффектов [77]. Анализ литературы показывает, что в зависимости от используемого ЭЭГ ритма и особенностей процедур биоуправления могут наблюдаться самые разнообразные реабилитационные и когнитивные эффекты.

Так, для совершенствования процессов обучения и памяти у человека могут использоваться

тренировки ЭЭГ-БОС на увеличение мощности сенсомоторного (12–15 Гц) и бета-1 (15–18 Гц) ритмов [54]. Один из наиболее распространенных вариантов ЭЭГ-БОС заключается в обучении пациентов увеличивать выраженность собственного альфа-ритма (8–13 Гц) ЭЭГ. Исходными для данного подхода послужили экспериментальные факты и представления о том, что при произвольной активации альфа-ритма у пациентов может формироваться так называемое “альфа-состояние”, характеризующееся общей релаксацией, спокойствием, приятными ощущениями и активизацией различных аспектов когнитивной активности человека [45]. Позитивные результаты получены также при лечении депрессивных и тревожных состояний с помощью процедур ЭЭГ-БОС на сочетанное изменение бета, альфа и тета ритмов [36].

В последнее время все большее признание приобретают процедуры ЭЭГ-БОС, в которых требуется направленно изменять не весь диапазон определенного ЭЭГ ритма, а его более узко-частотные компоненты. Так, например, при направленных процедурах ЭЭГ-БОС на увеличение выраженности только высокочастотной части (10–12 Гц) альфа-ритма ЭЭГ индивида отмечено повышение когнитивной активности, улучшение показателей мысленного вращения фигур и увеличение показателей рабочей памяти [32, 63].

4. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСОВ, ОСНОВАННЫХ НА ЭНДОГЕННЫХ РИТМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ЧЕЛОВЕКА

Несмотря на большую популярность и экспоненциальный рост исследований по проблеме нейроинтерфейсов, их эффективность пока остается под вопросом [69, 89], и в исследованиях ИМК и БОС существует ряд проблем, требующих своего решения [30, 71]. Среди наиболее актуальных выделяется проблема адекватного выбора мозговых сигналов, используемых для контроля интерфейсов мозг–компьютер [87]. Эта же проблема характерна для нейробиоуправления, где требуется найти наиболее подходящее решение вопроса о том, на какие аспекты кортикальной активности ориентироваться, где и как их использовать [78].

Дело в том, что для разных систем организма существуют свои резонансные частоты, играющие координирующую роль в настройке организма на оптимальное функционирование. Конкретные параметры эндогенных ритмов значительно варьируют от индивида к индивиду, но демонстрируют высокую стабильность у каждого данного человека [31, 84]. Поэтому все большее признание получают представления о необходимости использовать не заранее заданные ритмы, а ха-

рактерные и значимые для данного субъекта узконастроенные спектральные компоненты – эндогенные осцилляторы индивида [15, 73]. Это особенно важно при создании современных нейроинтерфейсов, где использование традиционных ритмов ЭЭГ или заранее заданных параметров ВСР можно рассматривать как игру на пианино в рукавицах – пытаюсь нажимать на нужные клавиши, пианист неизбежно будет также нажимать на соседние и вызвать какофонию звуков.

В наших исследованиях данная проблема решается путем использования специально созданных средств анализа ВСР [10] и ЭЭГ [16]. Эти средства позволяют в реальном времени выявлять узкочастотные эндогенные ВСР и ЭЭГ осцилляторы индивида, текущие параметры которых применяются в качестве управляющих сигналов во всех разрабатываемых нейроинтерфейсах.

Крайне важной и актуальной при создании нейроинтерфейсов является также проблема выбора и оптимальной организации сигналов обратной связи как важнейшего фактора, определяющего успешность биоуправления [25]. В наших исследованиях данная проблема решается в двух направлениях. Во-первых, исследован вопрос об оптимальных временных параметрах сигналов обратной связи [19]. Установлено, что наибольшая эффективность сеансов биоуправления наблюдается при минимальных (0.01 с) задержках сигналов обратной связи от ЭЭГ человека, а при их отставлении (на 2.56 с) эффективность биоуправления значительно снижается. Во-вторых, исследована применимость и эффективность использования в нейроинтерфейсах музыкальных или музыкаподобных сигналов обратной связи. Показано, что музыкальные [22] или музыкаподобные [17] воздействия, которые организуются в строгом соответствии с текущими значениями характерных и значимых для индивида узкочастотных ЭЭГ осцилляторов, выявляемых в реальном времени, значительно повышают эффективность процедур биоуправления.

Перспективными тенденциями современных исследований является сочетание разных вариантов технологии нейроинтерфейсов или одновременное использование разных эндогенных ритмов. Как показывает анализ литературы, такие мультимодальные [59, 68], мультисенсорные [83] или гибридные [34] нейроинтерфейсы позволяют применять комплексную обратную связь от эндогенных ритмических процессов индивида и дополнительно задействовать интегративные и адаптационные механизмы деятельности центральной нервной системы. Ярким примером такого подхода является предложенный для мониторинга и коррекции функционального состояния человека нейроинтерфейс “Biomusic” [37]. Авторы исходили из того, что физиологические

сигналы вегетативной нервной системы свидетельствуют о функциональном состоянии организма, но их обычно трудно интерпретировать. В разработанном нейроинтерфейсе эти физиологические сигналы преобразуются в музыкальные (электродермальная активность в мелодию, температура кожи – в музыкальную тональность, частота сердечных сокращений – в звуки барабана, а дыхание – в приятные подсвистывания, напоминающие звуки при выдохе).

Еще одна прогрессивная тенденция в развитии нейроинтерфейсов заключается в применении методов адаптивной нейростимуляции, при которых параметры сенсорной стимуляции автоматически, без осознания человеком, управляются сигналами обратной связи от его электрофизиологических характеристик [48, 66].

В соответствии с этими прогрессивными тенденциями, нами разработан музыкальный нейроинтерфейс на основе обратной связи от биопотенциалов мозга и сердца человека, сочетающий предельную индивидуальность ЭЭГ биоуправления с достоинством неосознаваемого восприятия воздействий, характерного для музыкальной терапии [24]. Его главным преимуществом является возможность применения в условиях, не требующих осознанных усилий испытуемых, что особенно важно при проведении лечебных сеансов с детьми и с пациентами, для которых характерны измененные психические состояния или противопоказана медикаментозная терапия. К настоящему времени музыкальный нейроинтерфейс успешно опробован для лечения синдрома дефицита внимания с гиперактивностью у детей [20] и устранения рисков функциональной надежности специалиста [21]. Кроме того, разработан и успешно опробован [23, 26] нейроинтерфейс, осуществляющий аудио-визуальную стимуляцию, автоматически управляемую биопотенциалами мозга и сердца человека, для устранения стресс-вызванных расстройств.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предпринятый анализ литературы показывает, что технологии нейроинтерфейсов уже в настоящее время играют значительную роль в арсенале нелекарственных средств оптимизации функционального состояния и когнитивной реабилитации человека. Особое место в данной линии разработок принадлежит нейроинтерфейсам, использующим эндогенные ритмы биоэлектрической активности мозга, сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Эти ритмические процессы тесно взаимосвязаны и составляют основу природной гомеостатической регуляции функций, они демонстрируют явления синхронизации и резонанса и характеризуются высокой чувствительностью к действию внешних факторов. Благодаря этому нейроинтер-

фейсы на основе эндогенных ритмов обладают повышенной эффективностью за счет ориентации на природные механизмы регуляции и пластичности мозга.

Система биопотенциалов мозга, сердечно-сосудистая и дыхательная системы характеризуются собственными резонансными частотами, которые играют координирующую роль в настройке организма на оптимальное функционирование. Конкретные параметры эндогенных ритмов и резонансных частот значительно варьируют от индивида к индивиду, но демонстрируют высокую стабильность у каждого данного человека. Это означает, что при создании современных нейроинтерфейсов необходимо использовать не заранее заданные и излишне широкополосные ритмические диапазоны, а характерные и значимые для данного субъекта узконастроенные эндогенные осцилляторы. При этом особенно важным является одновременное комплексное использование осцилляторов из разных частотных диапазонов или отражающих активность разных систем организма.

Именно на разработку таких нейроинтерфейсов направлены собственные исследования авторов по определению условий оптимальной организации сигналов обратной связи от эндогенных ритмов организма, разработке методов выявления и комплексного использования эндогенных осцилляторов. Показано, что такие нейроинтерфейсы обладают повышенной эффективностью за счет активного вовлечения резонансных, интеграционных и адаптационных механизмов деятельности центральной нервной системы.

Дальнейшие исследования в этом направлении и многопрофильное сотрудничество физиков, инженеров, математиков, психофизиологов и врачей позволят создать инструментарий для совершенствования когнитивной, мыслительной и мнестической деятельности человека, оптимизации режимов работы его мозга. Разработанные нейроинтерфейсы найдут применение в реабилитационных мероприятиях широкого профиля, в кабинетах психологической разгрузки на производстве, в образовательных учреждениях для активизации познавательной деятельности человека и процессов его обучения, в военной и спортивной медицине, медицине катастроф, научных исследованиях.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, гранты РФФИ №№ 18-013-01225, 18-413-520006, 19-013-00095.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атанов М.С., Иваницкий Г.А., Иваницкий А.М.* Когнитивный интерфейс мозг-компьютер и перспективы его практического использования // Физио-

логия человека. 2016. Т. 42. № 3. С. 5–11.
<https://doi.org/10.7868/S0131164616030036>

2. *Берестнева О.Г., Уразаев А.М., Шевелев Г.Е.* Биологические ритмы человека и их адаптационная динамика // Совр. пробл. науки и образования. 2014. № 2. С. 496–505.
<http://elibrary.ru/item.asp?id=21471494>.
3. *Джос Ю.С., Меньшикова И.А.* Возможности применения нейробиоуправления для повышения функциональных способностей головного мозга (обзор) // Журн. медико-биологических исследований. 2019. Т. 7. № 3. С. 338–348.
<https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2019.7.3.338>
4. *Дик О.Е., Ноздрачев А.Д.* Динамика паттернов электрической активности мозга при нарушениях его функционального состояния // Успехи физиол.наук. 2020. Т. 51. № 2. С. 68–87.
<https://doi.org/10.31857/S0301179820020046>
5. *Каплан А.Я.* Нейрофизиологические основания и практические реализации технологии мозг-машинных интерфейсов в неврологической реабилитации. Физиология человека // 2016. Т. 42. № 1. С. 118–127.
<https://doi.org/10.7868/S0131164616010100>
6. *Кривоногова Е.В., Поскотинова Л.В., Демин Д.Б.* Индивидуально-типологические варианты реактивности ЭЭГ колебаний при биоуправлении параметрами ритма сердца у подростков и молодых лиц на Севере // Журн. высш. нервн. деят. 2015. Т. 65. № 2. С. 203–211.
<https://doi.org/10.7868/S0044467715020069>
7. *Левицкая О.С., Лебедев М.А.* Интерфейс мозг-компьютер: будущее в настоящем // Вестн. Российского гос. мед. унив. 2016. № 2. С. 4–16.
<http://elibrary.ru/item.asp?id=26020709>.
8. *Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х., Черникова Л.А. и др.* Интерфейс мозг-компьютер: первый опыт клинического применения в России // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 1. С. 31–39.
<https://doi.org/10.7868/S0131164616010136>
9. *Новикова С.И.* Ритмы ЭЭГ и когнитивные процессы // Психологическая наука и образование. 2015. Т. 4. № 1. С. 91–108.
<http://psyjournals.ru/jmfp/2015/n1/76178.shtml>.
10. *Парин С.Б., Ветюгов В.В., Бахчина А.В., Полевая С.А.* Роль эндогенной опиоидной системы в управлении вариабельностью сердечного ритма в контексте когнитивных нагрузок разного уровня // Современные технологии в медицине. 2014. Т. 6. № 4. С. 116–126.
<http://elibrary.ru/item.asp?id=22804316>.
11. *Пирадов М.А., Черникова Л.А., Супонова Н.А.* Пластичность мозга и современные технологии нейрореабилитации // Вестник РАН. 2018. Т. 88. № 4. С. 299–312.
<https://doi.org/10.7868/S0869587318040023>
12. *Полевая С.А., Еремин Е.В., Буланов Н.А., Бахчина А.В., Ковальчук А.В., Парин С.Б.* Событийно-связанная телеметрия ритма сердца для персонифицированного дистанционного мониторинга когнитивных функций и стресса в условиях естественной деятельности // Современные технологии в медици-

- не. 2019. Т. 11. № 1. С. 1009–1015.
<https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.13>
13. Романчук Р.П., Романчук П.И. Нейрофизиология и нейрореабилитация когнитивных нарушений и расстройств // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. № 11. С. 176–196.
<https://doi.org/10.33619/2414-948/48/19>
14. Столбков Ю.К., Мошонкина Т.Р., Орлов И.В., Козловская И.Б., Герасименко Ю.П. Воображаемые движения как средство совершенствования и реабилитации моторных функций. Успехи физиол.наук. 2019. Т. 49. № 2. С. 45–59.
<https://doi.org/10.7868/S0301179818020030>
15. Федотчев А.И., Бондарь А.Т. Метод двойной обратной связи от ЭЭГ осцилляторов пациента для коррекции стресс-вызванных функциональных расстройств // Журн. высш. нервн. деят. 2008. Т. 58. № 3. С. 376–381.
<http://elibrary.ru/item.asp?id=10008461>
16. Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Бахчина А.В., Парин С.Б., Полевая С.А., Радченко Г.С. Музыкально-акустические воздействия, управляемые биопотенциалами мозга, в коррекции неблагоприятных функциональных состояний // Успехи физиологических наук. 2016. Т. 47. № 1. С. 69–79.
<http://elibrary.ru/item.asp?id=25849416>
17. Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Бахчина А.В., Григорьева В.Н., Катаев А.А., Парин С.Б., Радченко Г.С., Полевая С.А. Трансформация ЭЭГ-осцилляторов пациента в музыкалоподобные сигналы при коррекции стресс-индуцированных функциональных состояний // Современные технологии в медицине. 2016. Т. 8. № 1. С. 93–98.
<http://elibrary.ru/item.asp?id=25733373>
18. Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Семенов В.С. Обезболивающая электростимуляция, управляемая дыханием пациента // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2008. № 1–2. С. 10–18.
<http://elibrary.ru/item.asp?id=10026806>
19. Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Сем?нов В.С. Эффективность фотостимуляции, автоматически формируемой на основе ЭЭГ субъекта, снижается при отставлении обратной связи // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 4. С. 38–42.
<http://elibrary.ru/item.asp?id=26368260>
20. Федотчев А.И., Земляная А.А., Полевая С.А., Савчук Л.В. Синдром дефицита внимания с гиперактивностью и современные возможности его лечения методом нейробиоуправления // Журн. неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2016. Т. 16. № 5. С. 98–101. <http://elibrary.ru/item.asp?id=26165419>
21. Федотчев А.И., Крук В.М., Семикин Г.И. Функциональная надежность специалиста: современные риски и возможности их устранения // Успехи физиол. наук. 2019. Т. 50. № 3. С. 92–102.
<https://doi.org/10.1134/S0301179819030044>
22. Федотчев А.И., О Сан Чжун, Семикин Г.И. Сочетание технологии ЭЭГ биоуправления с музыкальной терапией для эффективной коррекции стресс-вызванных расстройств // Современные технологии в медицине. 2014. Т. 6. № 3. С. 60–63.
<http://elibrary.ru/item.asp?id=21810654>
23. 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. нерв. деят. 2019. Т. 69. № 2. С. 187–193.
<https://doi.org/10.1134/S0044467719020059>
24. Федотчев А.И., Парин С.Б., Полевая С.А. Нейроинтерфейсы, управляемые биопотенциалами мозга и сердца, в коррекции стресс-вызванных расстройств // Вестник РФФИ. Общественные и гуманитарные науки. 2019. № 1. С. 144–152.
<https://doi.org/10.22204/2587-8956-2019-094-01-144-152>
25. Федотчев А.И., Парин С.Б., Полевая С.А., Великова С.Д. Технологии “интерфейс мозг-компьютер” и нейробиоуправление: современное состояние, проблемы и возможности клинического применения // Современные технологии в медицине. 2017. Т. 9. № 1. С. 175–184.
<https://doi.org/10.17691/stm2017.9.1.01>
26. Федотчев А.И., Парин С.Б., Полевая С.А., Земляная А.А. Эффекты аудио-визуальной стимуляции, автоматически управляемой биопотенциалами мозга и сердца человека // Физиология человека. 2019. Т. 45. № 5. С. 75–79.
<https://doi.org/10.1134/S0131164619050023>
27. Фролов А.А., Гусек Д., Сильченко А.В., Тингера Я., Рыдло Я. Изменения гемодинамической активности мозга при воображении движений в результате тренировки испытуемых на управление интерфейсом мозг-компьютер // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 1. С. 5–16.
<https://doi.org/10.7868/S0131164616010082>
28. Фролов А.А., Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х. и др. Предварительные результаты контролируемого исследования эффективности технологии ИМК-экзоскелет при постинсультном парезе руки // Вестник Российского гос. мед. унив. 2016. № 2. С. 17–25. <http://elibrary.ru/item.asp?id=26020710>
29. 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. V. 16. № 1. P. 011001.
<https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaf12e>
30. 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. V. 378. P. 155–164.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.12.050>
31. Baltus A., Herrmann C.S. The importance of individual frequencies of endogenous brain oscillations for auditory cognition – A short review // Brain Res. 2016. V. 1640. Pt B. P. 243–250.
<https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.09.030>
32. Bazanova O.M., Auer T., Sapina E.A. On the Efficiency of Individualized Theta/Beta Ratio Neurofeedback Combined with Forehead EMG Training in ADHD Children // Front Hum Neurosci. 2018. V. 12. P. 3.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00003>
33. Cernes R., Zimlichman R. RESPeRATE: the role of paced breathing in hypertension treatment // J. Am.

- Soc. Hypertens. 2015. V. 9. № 1. P. 38–47.
<https://doi.org/10.1016/j.jash.2014.10.002>
34. *Chai R., Naik G.R., Ling S.H., Nguyen H.T.* Hybrid brain-computer interface for biomedical cyber-physical system application using wireless embedded EEG systems // *Biomed. Eng. Online.* 2017. V. 16. № 1. P. 5.
<https://doi.org/10.1186/s12938-016-0303-x>
 35. *Chaudhary U., Xia B., Silvani S., Cohen L.G., Birbaumer N.* Brain-Computer Interface-Based Communication in the Completely Locked-In State // *PLoS Biol.* 2017. V. 15. № 1. P. e1002593.
<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002593>
 36. *Cheon E.J., Koo B.H., Choi J.H.* The Efficacy of Neurofeedback in Patients with Major Depressive Disorder: An Open Labeled Prospective Study // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* 2016. V. 41. № 1. P. 103–110.
<https://doi.org/10.1007/s10484-015-9315-8>
 37. *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. V. 10. P. 401.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00401>
 38. *Clamor A., Koenig J., Thayer J.F., Lincoln T.M.* A randomized-controlled trial of heart rate variability biofeedback for psychotic symptoms // *Behav. Res. Ther.* 2016. V. 87. P. 207–215.
<https://doi.org/10.1016/j.brat.2016.10.003>
 39. *Deschodt-Arsac V., Lalanne R., Spiluttini B., Bertin C., Arsac L.M.* Effects of heart rate variability biofeedback training in athletes exposed to stress of university examinations // *PLoS One.* 2018. V. 13. № 7. P. e0201388.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201388>
 40. *De Vico Fallani F., Bassett D.S.* Network neuroscience for optimizing brain-computer interfaces // *Phys. Life Rev.* 2019. V. 31: P. 304–309.
<https://doi.org/10.1016/j.plrev.2018.10.001>
 41. *Dillon A., Kelly M., Robertson I.H., Robertson D.A.* Smartphone Applications Utilizing Biofeedback Can Aid Stress Reduction // *Front. Psychol.* 2016. V. 7. P. 832.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00832>
 42. *Eddie D., Vaschillo E., Vaschillo B., Lehrer P.* Heart rate variability biofeedback: Theoretical basis, delivery, and its potential for the treatment of substance use disorders // *Addict. Res. Theory.* 2015. V. 23. № 4. P. 266–272.
<https://doi.org/10.3109/16066359.2015.1011625>
 43. *Enriquez-Geppert S., Huster R.J., Herrmann C.S.* EEG-Neurofeedback as a Tool to Modulate Cognition and Behavior: A Review Tutorial // *Front. Hum. Neurosci.* 2017. V. 11. P. 51.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00051>
 44. *Fedotchev A.I., Kruk V.M., Oh S.J., Semikin G.I.* Eliminating the Risks of Specialist Functional Reliability via Utilization of Forward and Backward Links in the Man-Machine Systems // *International J. Industrial Ergonomics.* 2018. V. 68. P. 256–259.
<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.08.004>
 45. *Frederick J.A., Heim A.S., Dunn K.N., Powers C.D., Klein C.J.* Generalization of skills between operant control and discrimination of EEG alpha // *Conscious Cogn.* 2016. V. 45. P. 226–234.
<https://doi.org/10.1016/j.concog.2016.09.009>
 46. *Gaffney B.M., Maluf K.S., Davidson B.S.* Evaluation of Novel EMG Biofeedback for Postural Correction During Computer Use // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* 2016. V. 41. № 2. P. 181–189.
<https://doi.org/10.1007/s10484-015-9328-3>
 47. *Gámez A.B., Hernandez M.J.J., Martínez G.J.L., Esparza F., Martínez C.M.* The effect of surface electromyography biofeedback on the activity of extensor and dorsiflexor muscles in elderly adults: a randomized trial // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. № 1. P. 13153.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-49720-x>
 48. *Ganzer P.D., Sharma G.* Opportunities and challenges for developing closed-loop bioelectronic medicines // *Neural Regen. Res.* 2019. 14. № 1. P. 46–50.
<https://doi.org/10.4103/1673-5374.243697>
 49. *Gjorgjieva J., Evers J.F., Eglén S.J.* Homeostatic Activity-Dependent Tuning of Recurrent Networks for Robust Propagation of Activity // *J. Neurosci.* 2016. V. 36. № 13. P. 3722–3734.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2511-15.2016>
 50. *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. V. 47. № 15. P. 2578–2586.
<https://doi.org/10.1017/S0033291717001003>
 51. *Gonzalez-Rodriguez A., Ramon J.L., Morell V., Garcia G.J., Pomares J., Jara C.A., Ubeda A.* Evaluation of Optimal Vibrotactile Feedback for Force-Controlled Upper Limb Myoelectric Prostheses // *Sensors (Basel).* 2019. V. 19. № 23. P. 5209.
<https://doi.org/10.3390/s19235209>
 52. *Greco C.M., Sassone-Corsi P.* Circadian blueprint of metabolic pathways in the brain // *Nat. Rev. Neurosci.* 2019. V. 20. № 2. P. 71–82.
<https://doi.org/10.1038/s41583-018-0096-y>
 53. *Gross M.J., Shearer D.A., Bringer J.D., Hall R., Cook C.J., Kilduff L.P.* Abbreviated Resonant Frequency Training to Augment Heart Rate Variability and Enhance On-Demand Emotional Regulation in Elite Sport Support Staff // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* 2016. V. 41. № 3. P. 263–274.
<https://doi.org/10.1007/s10484-015-9330-9>
 54. *Gruzelier J.H.* EEG-neurofeedback for optimising performance. I: A review of cognitive and affective outcome in healthy participants // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2014. V. 44. P. 124–141.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.09.015>
 55. *Hampson M., Ruiz S., Ushiba J.* Neurofeedback // *Neuroimage.* 2019. P. 116473.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116473>
 56. *Haegens S., Zion Golumbic E.* Rhythmic facilitation of sensory processing: A critical review // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2018. V. 86. P. 150–165.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.12.002>
 57. *Heck D.H., McAfee S.S., Liu Y., Babajani-Feremi A., Rezaie R., Freeman W.J., Wheless J.W., Papanicolaou A.C., Ruzinkó M., Sokolov Y., Kozma R.* Breathing as a Fundamental Rhythm of Brain Function // *Front. Neural Circuits.* 2017. V. 10. P. 115.
<https://doi.org/10.3389/fncir.2016.00115>
 58. *Herrero J.L., Khuvis S., Yeagle E., Cerf M., Mehta A.D.* Breathing above the brain stem: volitional control and

- attentional modulation in humans // *J. Neurophysiol.* 2018. V. 119. № 1. P. 145–159.
<https://doi.org/10.1152/jn.00551.2017>
59. *Hinterberger T., Fürnrohr E.* The Sensorium: Psychophysiological Evaluation of Responses to a Multimodal Neurofeedback Environment // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* 2016. V. 41. № 3. P. 315–329.
<https://doi.org/10.1007/s10484-016-9332-2>
60. *Jackson A.F., Bolger D.J.* The neurophysiological bases of EEG and EEG measurement: A review for the rest of us // *Psychophysiology.* 2014. V. 51. № 11. P. 1061–1071.
<https://doi.org/10.1111/psyp.12283>
61. *Janka A., Adler C., Brunner B., Oppenrieder S., Duschek S.* Biofeedback Training in Crisis Managers: A Randomized Controlled Trial // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* 2017. V. 42. № 2. P. 117–125.
<https://doi.org/10.1007/s10484-017-9360-6>
62. *Jerath R., Crawford M.W., Barnes V.A., Harden K.* Self-regulation of breathing as a primary treatment for anxiety // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* 2015. V. 40. № 2. P. 107–115.
<https://doi.org/10.1007/s10484-015-9279-8>
63. *Kober S.E., Schweiger D., Reichert J.L., Neuper C., Wood G.* Upper Alpha Based Neurofeedback Training in Chronic Stroke: Brain Plasticity Processes and Cognitive Effects // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* 2017. V. 42. № 1. P. 69–83.
<https://doi.org/10.1007/s10484-017-9353-5>
64. *Kober S.E., Spörk R., Bauernfeind G., Wood G.* Age-related differences in the within-session trainability of hemodynamic parameters: a near-infrared spectroscopy-based neurofeedback study // *Neurobiol. Aging.* 2019. V. 81. P. 127–137.
<https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2019.05.022>
65. *Kotwas I., McGonigal A., Khalifa S., Bastien-Toniazzo M., Bartolomei F., Micoulaud-Franchi J.A.* A case-control study of skin conductance biofeedback on seizure frequency and emotion regulation in drug-resistant temporal lobe epilepsy // *Int. J. Psychophysiol.* 2018. V. 123. P. 103–110.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2017.10.005>
66. *Lo M.C., Widge A.S.* Closed-loop neuromodulation systems: next-generation treatments for psychiatric illness // *Int. Rev. Psychiatry.* 2017. V. 29. № 2. P. 191–204.
<https://doi.org/10.1080/09540261.2017.1282438>
67. *Lopez-Samaniego L., Garcia-Zapirain B.* A Robot-Based Tool for Physical and Cognitive Rehabilitation of Elderly People Using Biofeedback // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2016. V. 13. № 12. P. 1176.
<https://doi.org/10.3390/ijerph13121176>
68. *Manor R., Mishali L., Geva A.B.* Multimodal Neural Network for Rapid Serial Visual Presentation Brain Computer Interface // *Front. Comput. Neurosci.* 2016. V. 10. P. 130.
<https://doi.org/10.3389/fncom.2016.00130>
69. *Marzbani H., Marateb H.R., Mansourian M.* Neurofeedback: A Comprehensive Review on System Design, Methodology and Clinical Applications // *Basic Clin. Neurosci.* 2016. V. 7. № 2. P. 143–158.
<https://doi.org/10.15412/J.BCN.03070208>
70. *Massaro S.* Neurofeedback in the workplace: from neurorehabilitation hope to neuroleadership hype? // *Int. J. Rehabil. Res.* 2015. V. 38. № 3. P. 276–278.
<https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000119>
71. *McFarland D.J., Vaughan T.M.* BCI in practice // *Prog. Brain Res.* 2016. V. 228. P. 389–404.
<https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2016.06.005>
72. *Miranda R.A., Casebeer W.D., Hein A.M. et al.* DARPA-funded efforts in the development of novel brain-computer interface technologies // *J. Neurosci. Methods.* 2015. V. 244. P. 52–67.
<https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2014.07.019>
73. *Myrden A., Chau T.* Feature clustering for robust frequency-domain classification of EEG activity // *J. Neurosci. Methods.* 2016. V. 13. № 6. P. 066022.
<https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2016.01.014>
74. *Nagai Y., Jones C.I., Sen A.* Galvanic Skin Response (GSR)/Electrodermal/Skin Conductance Biofeedback on Epilepsy: A Systematic Review and Meta-Analysis // *Front. Neurol.* 2019. V. 10. P. 377.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00377>
75. *Neblett R.* Surface Electromyographic (SEMG) Biofeedback for Chronic Low Back Pain // *Healthcare (Basel).* 2016. V. 4. № 2. P. 27.
<https://doi.org/10.3390/healthcare4020027>
76. *Nozaradan S., Peretz I., Keller P.E.* Individual Differences in Rhythmic Cortical Entrainment Correlate with Predictive Behavior in Sensorimotor Synchronization // *Sci Rep.* 2016. V. 6. P. 20612.
<https://doi.org/10.1038/srep20612>
77. *Omejc N., Rojc B., Battaglini P.P., Marusic U.* Review of the therapeutic neurofeedback method using electroencephalography: EEG Neurofeedback // *Bosn. J. Basic Med. Sci.* 2019. V. 19. № 3. P. 213–220.
<https://doi.org/10.17305/bjbm.2018.3785>
78. *Papo D.* Neurofeedback: Principles, appraisal, and outstanding issues // *Eur. J. Neurosci.* 2019. V. 49. № 11. P. 1454–1469.
<https://doi.org/10.1111/ejn.14312>
79. *Petta L.M.* Resonance Frequency Breathing Biofeedback to Reduce Symptoms of Subthreshold PTSD with an Air Force Special Tactics Operator: A Case Study // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* 2017. V. 42. № 2. P. 139–146.
<https://doi.org/10.1007/s10484-017-9356-2>
80. *Pfeifer G., Garfinkel S.N., Gould van Praag C.D., Sahota K., Beika S., Critchley H.D.* Feedback from the heart: Emotional learning and memory is controlled by cardiac cycle, interoceptive accuracy and personality // *Biol. Psychol.* 2017. V. 126. P. 19–29.
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2017.04.001>
81. *Pokrovskii V.M., Polischuk L.V.* Cardiorespiratory synchronism in estimation of regulatory and adaptive organism status // *J. Integr. Neurosci.* 2016. V. 15. № 1. P. 19–35.
<https://doi.org/10.1142/S0219635216500060>
82. *Ros T., Baars B., Lanius R.A., Vuilleumier P.* Tuning pathological brain oscillations with neurofeedback: a systems neuroscience framework // *Front. Hum. Neurosci.* 2014. V. 8. P. 1008.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.01008>
83. *Roy C., Lagarde J., Dotov D., Dalla Bella S.* Walking to a multisensory beat // *Brain Cogn.* 2017. V. 113. P. 172–183.
<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.02.002>

84. *Shaffer F., Ginsberg J.P.* An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms // *Front. Public Health.* 2017. V. 5. P. 258.
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
85. *Shaffer F., McCraty R., Zerr C.L.* A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability // *Front. Psychol.* 2014. V. 5. P. 1040.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01040>
86. *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. V. 18. № 2. P. 86–100.
<https://doi.org/10.1038/nrn.2016.164>
87. *Slutzky M.W., Flint R.D.* Physiological properties of brain-machine interface input signals // *J. Neurophysiol.* 2017. V. 118. № 2. P. 1329–1343.
<https://doi.org/10.1152/jn.00070.2017>
88. *Steffen P.R., Austin T., DeBarros A., Brown T.* The Impact of Resonance Frequency Breathing on Measures of Heart Rate Variability, Blood Pressure, and Mood // *Front. Public Health.* 2017. V. 5. P. 222.
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00222>
89. *Thibault R.T., Lifshitz M., Raz A.* The self-regulating brain and neurofeedback: experimental science and clinical promise // *Cortex.* 2016. V. 74. P. 247–261.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.10.024>
90. *Tolin D.F., Davies C.D., Moskow D.M., Hofmann S.G.* Biofeedback and Neurofeedback for Anxiety Disorders: A Quantitative and Qualitative Systematic Review // *Adv. Exp. Med. Biol.* 2020. V. 1191. P. 265–289.
https://doi.org/10.1007/978-981-32-9705-0_16
91. *Valeriani D., Cinel C., Poli R.* Brain-Computer Interfaces for Human Augmentation // *Brain Sci.* 2019. V. 9. № 2. P. 22.
<https://doi.org/10.3390/brainsci9020022>
92. *Zaccaro A., Piarulli A., Laurino M., Garbella E., Menicucci D., Neri B., Gemignani A.* How Breath-Control Can Change Your Life: A Systematic Review on Psycho-Physiological Correlates of Slow Breathing // *Front. Hum. Neurosci.* 2018. V. 12. P. 353.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00353>

Neurointerfaces Based on Endogenous Rhythms of the Body to Optimize the Functional State of a Person and His Cognitive Rehabilitation

A. I. Fedotchev^{1, *}, S. B. Parin², S. A. Polevaya³

¹*Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow region, 142290 Russia*

²*Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

³*Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod, 603005 Russia*

**e-mail: fedotchev@mail.ru*

Abstract—The review of research papers of last 5 years on a problem of designing and management in technogenic systems - neurointerfaces and neurofeedback systems — is presented. Modern approaches to the use of neurointerfaces in medicine, engineering psychology and in cognitive rehabilitation of a person are considered. The main attention is paid to the neurointerfaces based on the use of system-forming endogenous rhythms of the body - the rhythms of the electroencephalogram (EEG), the rhythm of the heartbeats and the rhythm of breathing. The advantages, state of the art and the problems of this line of research are analyzed, and promising ways of solving its key issues are outlined. The results of the authors' own developments in this direction are presented.

Keywords: brain-computer interface, neurofeedback, electroencephalogram (EEG), system-forming endogenous rhythms, musical neurointerface, functional state correction