

**ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ
(КОГНИТИВНОЙ) ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**

УДК 612.821:612.822.3

**КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ОТ БИОПОТЕНЦИАЛОВ МОЗГА
И СЕРДЦА В КОРРЕКЦИИ СТРЕСС-ИНДУЦИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ**

© 2019 г. А. И. Федотчев^{1,*}, С. Б. Парин², К. Н. Громов², Л. В. Савчук³, С. А. Полевая³

¹ *Лаборатория механизмов рецепции Института биофизики клетки РАН, г. Пущино, Россия*

² *Кафедра психофизиологии Нижегородского государственного университета им Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия*

³ *Отдел нейрофизиологии и экспериментального моделирования Приволжского исследовательского медицинского университета, Нижний Новгород, Россия*

* e-mail: fedotchev@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2018 г.

После доработки 27.07.2018 г.

Принята к публикации 24.09.2018 г.

Проведена экспериментальная проверка предположения о том, что комплексная обратная связь, использующая управляющие сигналы не только от ЭЭГ пациента, но и от ритма его сердцебиений, может привести к увеличению эффективности подавления стресс-индуцированных состояний. В одном из двух обследований испытуемым-добровольцам предъявляли аудио-визуальные воздействия, формируемые только на основе текущих значений их электроэнцефалограммы (ЭЭГ). В другом обследовании при формировании воздействий вводили дополнительный контур обратной связи от ритма сердцебиений испытуемого. Как и предполагалось, в условиях комплексной обратной связи от биопотенциалов мозга и сердца выявлены достоверные позитивные эффекты в виде роста мощности альфа-ритма ЭЭГ, увеличения оценок самочувствия и настроения, а также снижения уровня эмоциональной дезадаптации испытуемых. Повышенная эффективность опробованного нейроинтерфейса достигается, по-видимому, за счет активного вовлечения интеграционных и адаптационных механизмов деятельности центральной нервной системы в процессы восприятия и обработки значимых для человека interoцептивных сигналов.

Ключевые слова: нейробиоуправление, интерфейс мозг–компьютер, комплексная обратная связь, электроэнцефалограмма (ЭЭГ), вариабельность сердечного ритма (ВСР), коррекция состояния

DOI: 10.1134/S0044467719020059

В последнее время технологии нейроинтерфейсов, включая интерфейс мозг–компьютер и нейробиоуправление, становятся лечебным инструментом для множества психических [Costa E Silva, Steffen, 2017] и неврологических [Каплан, 2016; Левицкая, Лебедев, 2016] расстройств, восстановления и улучшения нервных, когнитивных и поведенческих функций человека [Фролов, Бобров, 2017; Enriquez-Geppert et al., 2017; Renton et al., 2017]. Общей чертой этих технологий является их предельная персонализация через использование обратной связи от индивидуальных биоэлектрических характеристик пациента при организации лечебных воздействий [Федотчев и др., 2017]. Благодаря

этому данная линия исследований полностью соответствует стратегическим направлениям развития отечественного здравоохранения, предполагающим переход к персонализированной медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям здоровьесбережения [Указ Президента РФ, 2016].

Анализ литературы показывает, что центральной проблемой технологий нейроинтерфейсов является проблема оптимальной организации сигналов обратной связи как важнейшего фактора, определяющего успешность нейробиоуправления [Федотчев и др., 2017]. Для ее решения теоретически обоснованы и предложены подходы, предполагающие применение музыкальных или музыкоподобных

сигналов обратной связи от собственных биоэлектрических характеристик, облегчающих пациенту их восприятие и способствующих увеличению эффективности лечебных воздействий [Федотчев, Радченко, 2013; Константинов и др., 2014; Bergstrom et al., 2014]. Особенно перспективной считается разработка комбинированных [Friedrich et al., 2014] или гибридных [Choi et al., 2017] нейроинтерфейсов, в которых используется комплексная мультимодальная обратная связь не только от параметров электроэнцефалограммы (ЭЭГ), но и от других систем организма [Hong, Khan, 2017].

Ранее нами был предложен и успешно опробован при подавлении функциональных расстройств, вызванных стрессом, метод двойной обратной связи от ЭЭГ-ритмов пациента [Федотчев, Бондарь, 2008], основанный на двух контурах обратной связи от узкочастотных ЭЭГ-осцилляторов индивида. Первый контур представляет собой обычный контур биоуправления, в котором звуковые сигналы обратной связи от узкочастотного ЭЭГ-осциллятора воспринимаются пациентом осознанно и служат ему ориентиром для подавления/активации этих компонентов собственной ЭЭГ. Второй контур является дополнительным контуром резонансной стимуляции, который помогает пациентам преодолевать трудности осознания и активного использования сигналов обратной связи. В нем параметры зрительных воздействий автоматически настраиваются на частоту доминирующего у пациента узкочастотного ЭЭГ-осциллятора (из того же или другого частотного диапазона ЭЭГ) с целью его резонансной активации.

Впоследствии был разработан и опробован в модельных экспериментах музыкальный нейроинтерфейс [Федотчев и др., 2018], в котором аудио-визуальные воздействия, формируемые на основе ЭЭГ испытуемого, дополнялись ритмическими звуковыми сигналами, моделирующими нормальный, учащенный или уреженный ритм сердцебиений человека. Наиболее выраженные эффекты были выявлены в случаях, когда ритм дополнительных звуковых воздействий совпадал с собственным исходным сердечным ритмом испытуемого. Полученные данные позволили предположить, что комплексная обратная связь, использующая управляющие сигналы не только от ЭЭГ человека, но и от ритма его

сердцебиений, может привести к увеличению эффективности нейроинтерфейса.

Цель представленной работы заключалась в экспериментальной проверке нашего предположения путем сравнительного анализа эффектов, наблюдаемых при отсутствии (контрольная серия) и введении дополнительного контура обратной связи от текущего ритма сердцебиений испытуемого (серия Ритм). С каждым из 16 испытуемых-добровольцев, находящихся в состоянии стресса в период экзаменационной сессии, проведено по 2 эксперимента. В одном из них (контрольная серия) испытуемым предъявляли музыкоподобные сигналы, плавно варьирующие по высоте тона и интенсивности в прямой зависимости от текущей амплитуды доминирующего у субъекта спектрального ЭЭГ-компонента (альфа ЭЭГ осциллятора) и по тембру напоминающие звуки флейты, а также световые воздействия, получаемые в реальном времени путем прямой трансформации оцифрованной ЭЭГ в светодиодные мелькания. В другом эксперименте (серия Ритм) варьирование звуков флейты по высоте тона и интенсивности дополнялось введением звуковых сигналов от текущего ритма сердцебиений испытуемого.

МЕТОДИКА

В исследовании приняли участие 16 испытуемых в возрасте от 18 до 23 лет студентов Нижегородского госуниверситета, находящихся в состоянии стресса в период экзаменационной сессии и добровольно согласившихся на 2 обследования. Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией (принятой в июне 1964 г. в Хельсинки, Финляндия и пересмотренной в октябре 2000 г. в Эдинбурге, Шотландия). От каждого испытуемого получено информированное согласие.

В начале каждого обследования для оценки психофизиологического состояния испытуемых проводили их краткий опрос и начальное тестирование с помощью теста "САН", в котором испытуемые дают оценку текущего самочувствия, активности и настроения [Доскин и др., 1978], и теста "УЭД", дающего возможность определять текущий уровень эмоциональной дезадаптации [Григорьева, Тхостов, 2007]. Для оценки УЭД участнику тестирования предлагалось указать зону своего текущего состояния в круговом

пространстве состояний, границы которого определены в четырех точках пересечения диагоналей с окружностью. В полученных секторах были заданы наборы синонимичных прилагательных, описывающих разные эмоциональные состояния. В зависимости от положения указанной зоны определяется количество набранных человеком баллов для каждого из 4 наборов прилагательных. По среднему баллу судили о степени эмоциональной дезадаптации следующим образом: 0 баллов – отсутствие эмоциональной дезадаптации (физиологическая релаксация); 1 балл – слабо выраженная эмоциональная дезадаптация (физиологическое напряжение); 2 – умеренно выраженная эмоциональная дезадаптация (патологическое напряжение); 3 – резко выраженная эмоциональная дезадаптация (патологическая релаксация).

Затем устанавливали ЭЭГ-датчики (активный электрод в отведении Cz, референтный и заземляющий – на мочках ушей), оригинальную систему регистрации электрокардиограммы с online-анализом показателей variability сердечного ритма [Полевая и др., 2013], фиксировали наушники и светодиодные очки, в затемненные линзы которых были вмонтированы красные светодиоды с мощностью, не превышающей 100 мкВт. Испытуемых просили сидеть спокойно с закрытыми глазами в течение всей процедуры.

Каждый эксперимент начинался с 30-секундной записи фоновой электрической активности мозга при диапазоне фильтрации ЭЭГ 2–32 Гц и частоте дискретизации сигналов 100 Гц, в ходе которой с помощью оригинальной модификации динамического спектрального анализа, основанного на быстрых преобразованиях Фурье [Федотчев и др., 2010], определялся доминирующий у конкретного испытуемого узкополосный (0.4–0.6 Гц) спектральный компонент в диапазоне альфа-ритма (8–13 Гц) ЭЭГ. Затем на 10 мин включался рабочий режим, где испытуемым предъявлялись аудио-визуальные воздействия, формируемые на основе ЭЭГ. При этом текущая амплитуда выявленного ЭЭГ-осциллятора преобразовывалась в музыкаподобные сигналы, по тембру напоминающие звуки флейты, и плавно варьирующие по высоте тона (диапазон 100–2000 Гц) и интенсивности (диапазон 0–40 дБ) в прямой зависимости от текущей амплитуды ЭЭГ-осциллятора. Одновременно осуществлялись светодиодные воздействия в строгом соответствии с теку-

щими значениями нативной ЭЭГ испытуемого. Это достигалось путем нормирования оцифрованных значений ЭЭГ, при котором наибольшая отрицательная величина ЭЭГ-сигнала соответствовала минимальному, а наибольшая положительная величина – максимальному свечению светодиодов.

В одном из двух обследований (серия Ритм) описанная экспериментальная процедура дополнялась введением в музыкаподобные воздействия, генерируемые на основе ЭЭГ, слабых (порядка 10 дБ) звуковых сигналов, формируемых системой регистрации электрокардиограммы и соответствующих текущему ритму сердцебиений испытуемого.

При обработке результатов анализировали показатели мощности тета- и альфа-ритмов ЭЭГ, показатели деятельности сердечно-сосудистой системы и результаты выполнения тестов САН и УЭД. Основное внимание при анализе variability сердечного ритма (VSR) уделялось оригинальным показателям – мощности волн сверхвысокочастотной (0.8–2.0 Гц) области спектра VSR (СВЧ VSR) и стресс-индексу VSR (СИ VSR), которые ранее продемонстрировали информативность при анализе краткосрочных регуляторных воздействий на сердечный ритм [Парин и др., 2014].

Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ “Origin 6.0” и “Сигма-Плот 11.0”. Вычисляли средние для групп значения показателей (M) и стандартные ошибки (m). Для определения уровней значимости различий (P) каждого показателя до и после воздействия использовали непараметрический критерий знаковых рангов для малых выборок Вилкоксона-Манна-Уитни (Mann-Whitney Rank Sum Test).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценку эффектов воздействий в контрольной (без дополнительного сердечного ритма) и экспериментальной (с введением сердечного ритма) сериях исследований проводили путем сопоставления основных показателей, зарегистрированных перед началом и после воздействий (таблица 1).

Из данных таблицы 1 следует, что под влиянием обеих лечебных процедур в ЭЭГ испытуемых происходили закономерные изменения: мощность тета-активности ЭЭГ под влиянием воздействий уменьшалась, а мощность альфа-активности ЭЭГ – увеличива-

Таблица 1. Средние значения (M), стандартные ошибки (m) и уровень различий *p* показателей, зарегистрированных до и после воздействия в двух сериях экспериментов
Table 1. Mean values (M), standard errors (m) and the level of differences *p* of the indicators recorded before and after exposure in two series of experiments

Показатель	Контрольная серия			Серия “Ритм”		
	До	После	<i>p</i>	До	После	<i>p</i>
ЭЭГ-тета (отн. ед.)	268.3 ± 21.3	260.7 ± 18.5	0.901	290.2 ± 18.4	272.5 ± 14.2	0.454
ЭЭГ-альфа (отн. ед.)	237.8 ± 11.3	260.2 ± 11.2	0.125	254.7 ± 10.5	293.6 ± 8.9	0.009
ЧСС (уд/мин)	79.2 ± 3.1	79.4 ± 3.1	0.801	77.4 ± 2.4	77.0 ± 2.4	0.959
СВЧ-ВСР (отн. ед.)	7428 ± 2413	7248 ± 1359	0.948	6093 ± 932	6119 ± 922	0.865
СИ ВСР (отн. ед.)	0.42 ± 0.06	0.40 ± 0.06	0.848	0.516 ± 0.06	0.44 ± 0.04	0.370
САН-С (баллы)	4.48 ± 0.25	4.87 ± 0.30	0.244	4.59 ± 0.27	5.31 ± 0.21	0.045
САН-А (баллы)	4.44 ± 0.24	4.10 ± 0.29	0.393	4.41 ± 0.23	4.43 ± 0.21	0.954
САН-Н (баллы)	5.23 ± 0.21	5.51 ± 0.19	0.336	4.86 ± 0.33	5.58 ± 0.26	0.048
УЭД (баллы)	1.25 ± 0.22	0.74 ± 0.19	0.091	0.94 ± 0.19	0.41 ± 0.15	0.015

Примечание. Значимые различия показателей выделены жирным шрифтом.
Note. Significant differences in indicators are shown in bold.

лась. Наиболее выраженные и значимые изменения происходили в мощности альфа-ритма ЭЭГ в серии с введением дополнительного ритма. Под влиянием обеих лечебных процедур частота сокращений сердца (ЧСС) испытуемых практически не менялась. Небольшие разнонаправленные сдвиги отмечены в выраженности СВЧ ВСР: в контрольной серии без ритма она сокращалась, а при введении дополнительного ритма — наоборот, увеличивалась. Стресс-индекс под влиянием лечебных воздействий сокращался в большей степени в серии “Ритм”. Можно также видеть, что в результате лечебных процедур происходили позитивные изменения в субъективных оценках состояния испытуемых: увеличивались показатели самочувствия и настроения в тесте САН, а также снижался уровень эмоциональной дезадаптации. Эти изменения были более выраженными и достоверными при введении в предъявляемые звуковые сигналы дополнительного ритма, соответствующего текущему ритму сердечных сокращений испытуемого.

Дальнейший анализ показал, что в серии Ритм эффекты воздействия существенно зависели от исходных значений показателей ВСР. Так, только у подгруппы, демонстрирующей более высокие исходные значения СВЧ ВСР, в результате лечебных процедур наблюдалось достоверное ($p = 0.010$) снижение УЭД (на $89.6 \pm 8.0\%$). Кроме того, достоверное ($p = 0.015$) снижение показателя УЭД (на $64.8 \pm 14.2\%$) было отмечено также у под-

группы испытуемых, исходно имевших более низкие значения стресс-индекса ВСР.

Опрос испытуемых о субъективных ощущениях в ходе каждой лечебной процедуры показал, что часть обследуемых (3 из 16) не заметили каких-либо различий в акустических воздействиях, предъявленных в ходе двух процедур. Звуковые сигналы в контрольной серии, напоминающие плавно меняющиеся по высоте тона и интенсивности звуки флейты, вызывали у половины обследуемых своеобразные ощущения — от ориентировочных реакций и настороженности до ярких эмоциональных впечатлений. Большинство испытуемых (12 из 16) отметили, что введение сердечного ритма в предъявляемые звуковые воздействия способствует повышению их “музыкальности” и более позитивному восприятию. По данным субъективных отчетов после процедуры выявлено положительное отношение пациентов к проведенным лечебным сеансам, снижение уровня стресса и улучшение эмоционального состояния.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, при музыкоподобных воздействиях, получаемых путем трансформации ЭЭГ субъекта в звуки флейты и придании структурированности предъявляемым звуковым сигналам введением в них ритма сердцебиений испытуемого, происходит достоверное увеличение мощности альфа-ритма ЭЭГ относительно фона, сопровождаемое

позитивными сдвигами показателей самочувствия и настроения (тест САН) и снижением степени эмоциональной дезадаптации (тест УЭД). Эти данные, наряду с результатами опроса испытуемых после комбинированных воздействий, могут свидетельствовать о формировании у испытуемых в результате лечебных процедур так называемого “альфа-состояния” [Frederick, 2012], которое характеризуется общей релаксацией со снижением уровня стресса, тревожности и депрессии.

Повышенная эффективность использованного нами нейроинтерфейса с комплексной обратной связью не только от ЭЭГ, но и от сердечного ритма может быть связана с известными преимуществами мультимодальных и гибридных нейроинтерфейсов такими, как обогащение обратной связи [Sollfrank et al., 2016], увеличение количества управляющих команд [Hong et al., 2017] и более активное вовлечение субъекта в реабилитационные процессы [Gui et al., 2017]. Известно также, что обратная связь от ритма сердцебиений может способствовать адекватному формированию эмоций [Dunn et al., 2010] и улучшать процессы эмоциональной памяти [Pfeifer et al., 2017].

В настоящее время в литературе ведется дискуссия по поводу того, можно ли предсказывать эффективность того или иного нейроинтерфейса [Alkoby et al., 2017]. В связи с этим особый интерес представляют полученные нами данные о существовании значимой зависимости наблюдаемых эффектов от исходных индивидуальных характеристик ВСР испытуемых. Показано, что позитивные сдвиги в уровне эмоциональной дезадаптации наблюдаются в результате комбинированных воздействий только при исходно высоких значениях СВЧ ВСР и исходно низких значениях стресс-индекса ВСР. Эти индивидуальные характеристики можно рассматривать как предикторы эффективности разработанного нейроинтерфейса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют, что использование музыкального нейроинтерфейса с комплексной обратной связью от биопотенциалов мозга и сердца является эффективным подходом к коррекции стресс-индуцированных состояний, приводящим даже после однократного воздействия к позитивным сдвигам как объективных, так и субъективных показателей. Повышенная эф-

фективность опробованного нейроинтерфейса достигается, по-видимому, за счет активного вовлечения интеграционных и адаптационных механизмов деятельности центральной нервной системы в процессы восприятия и обработки значимых для человека интерцептивных сигналов.

Такие нейроинтерфейсы после дополнительных исследований могут найти применение в широком спектре реабилитационных процедур, 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 выполнена при поддержке Российского Гуманитарного научного фонда, грант РГНФ № 16-06-00133, и Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ № 18-013-01225.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорьева В.М., Тхостов А.Ш.* Способ оценки эмоционального состояния человека. Патент РФ № 2291720 С1. 20.01.2007.
- Доскин В.А., Лаврентьева Н.А., Мирошников М.Н., Шарай В.В.* Тест дифференцированной самооценки функционального состояния. Вопросы психологии. 1973. № 6: 141–145.
- Каплан А.Я.* Нейрофизиологические основания и практические реализации технологии мозговых интерфейсов в неврологической реабилитации. Физиология человека. 2016. 42 (1): 118–127. doi 10.7868/S0131164616010100
- Константинов К.В., Леонова М.К., Мирошников Д.Б., Клименко В.М.* Особенности восприятия акустического образа собственной биоэлектрической активности головного мозга. Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2014. 100 (6): 710–721.
- Левецкая О.С., Лебедев М.А.* Интерфейс мозг-компьютер: будущее в настоящем. Вестн. Российского гос. мед. ун-ва. 2016. 2: 4–16.
- 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. 6 (4): 116–124.
- Полевая С.А., Некрасова М.М., Рунова Е.В., Бахчина А.В., Горбунова Н.А., Брянцева Н.В., Кожевников В.В., Шишалов И.С., Парин С.Б.* Дис-

- кретный мониторинг и телеметрия сердечного ритма в процессе работы на компьютере для оценки и профилактики утомления и стресса. Медицинский альманах. 2013. 2 (26): 151–155.
- Указ Президента РФ № 642 от 1 декабря 2016 года “О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации”.
- Федотчев А.И., Бондарь А.Т. Метод двойной обратной связи от ЭЭГ ритмов пациента для коррекции функциональных расстройств, вызванных стрессом. Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2008. 58 (3): 376–381.
- Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Семёнов В.С. Нелекарственная коррекция функциональных расстройств у человека. Принцип двойной обратной связи от ЭЭГ осцилляторов пациента. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2010. 79 стр.
- Федотчев А.И., Журавлев Г.И., Ексина К.И., Сулантьева 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. Т. 104 (1): 122–128.
- Федотчев А.И., Парин С.Б., Полевая С.А., Великова С.Д. Технологии “интерфейс мозг-компьютер” и нейробиоуправление: современное состояние и перспективы клинического применения. Современные технологии в медицине. 2017. 9 (1): 175–184. doi 10.17691/stm2017.9.1.01
- Федотчев А.И., Радченко Г.С. Музыкальная терапия и музыка мозга: состояние, проблемы и перспективы исследований. Успехи физиол. наук. 2013. 44 (4): 34–48.
- Фролов А.А., Бобров П.Д. Интерфейс мозг-компьютер: нейрофизиологические предпосылки и клиническое применение. Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2017. Т. 67 (4): 365–376.
- 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. 2017 Jan 7. pii: S0306-4522(16)30757-6. doi 10.1016/j.neuroscience.2016.12.050
- Bergstrom I., Seinfeld S., Arroyo-Palacios J., Slater M., Sanchez-Vives M.V. Using music as a signal for biofeedback. Int. J. Psychophysiol. 2014. 93 (1): 140–149. doi 10.1016/j.ijpsycho.2013.04.013
- Choi I., Rhiu I., Lee Y., Yun M.H., Nam C.S. A systematic review of hybrid brain-computer interfaces: Taxonomy and usability perspectives. PLoS One. 2017. Apr 28. 12 (4): e0176674. doi 10.1371/journal.pone.0176674
- Costa E Silva J.A., Steffen R.E. The future of psychiatry: brain devices. Metabolism. 2017. 69S: S8–S12. doi 10.1016/j.metabol.2017.01.010
- Dunn B.D., Galton H.C., Morgan R., Evans D., Oliver C., Meyer M., Cusack R., Lawrence A.D., Dalgleish T. Listening to your heart. How interoception shapes emotion experience and intuitive decision making. Psychol Sci. 2010. 21 (12): 1835–1844. doi 10.1177/0956797610389191
- 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. Feb 22;11: 51. doi 10.3389/fnhum.2017.00051
- Frederick J.A. Psychophysics of EEG alpha state discrimination. Conscious Cogn. 2012. 21 (3): 1345–1354. doi 10.1016/j.concog.2012.06.009
- Friedrich E.V., Suttie N., Sivanathan A., Lim T., Louchart S., Pineda J.A. Brain-computer interface game applications for combined neurofeedback and biofeedback treatment for children on the autism spectrum. Front. Neuroeng. 2014. Jul 3; 7: 21. doi 10.3389/fneng.2014.00021
- Gui K., Liu H., Zhang D. Towards Multimodal Human-Robot Interaction to Enhance Active Participation of Users in Gait Rehabilitation. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 2017. 25 (11): 2054–2066. doi 10.1109/TNSRE.2017.2703586
- Hong K.S., Khan M.J. Hybrid brain-computer interface techniques for improved classification accuracy and increased number of commands: A review. Front. Neurorobot. 2017. Jul 24. 11: 35. doi 10.3389/fnbot.2017.00035
- Pfeifer G., Garfinkel S.N., Gould van Praag C.D. Sahaeta K., Betka S., Critchley H.D. Feedback from the heart: Emotional learning and memory is controlled by cardiac cycle, interoceptive accuracy and personality. Biol Psychol. 2017. 126: 19–29. doi 10.1016/j.biopsycho.2017.04.001
- Renton T., Tibbles A., Topolovec-Vranic J. Neurofeedback as a form of cognitive rehabilitation therapy following stroke: A systematic review. PLoS One. 2017. May 16. 12 (5): e0177290. doi 10.1371/journal.pone.0177290
- Sollfrank T., Ramsay A., Perdakis S., Williamson J., Murray-Smith R., Leeb R., Millán J.D.R., Kübler A. The effect of multimodal and enriched feedback on SMR-BCI performance. Clin. Neurophysiol. 2016. 127 (1):490–498. doi 10.1016/j.clinph.2015.06.004

COMPLEX FEEDBACK FROM THE BIOPOTENTIALS OF THE BRAIN AND HEART IN THE CORRECTION OF STRESS-INDUCED STATES

A. I. Fedotchev^{a,#}, S. B. Parin^b, K. N. Gromov^b, L. V. Savchuk^c, and S. A. Polevaya^c

^a *Institute of Cell Biophysics RAS, Pushchino, Russia*

^b *Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia*

^c *Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russia*

[#]*e-mail: fedotchev@mail.ru*

The study presents the results of experimental verification of the assumption that a complex feedback using control signals not only from the patient's EEG but also from the rhythm of his heartbeats can lead to an increase in the effectiveness of suppression of stress-induced states. In one of the two examinations, volunteer subjects were presented with audio-visual stimulation, formed only on the basis of their electroencephalogram (EEG). In another examination, an additional feedback loop was introduced from the rhythm of subject's heartbeats. As expected, in the case of complex feedback from brain and heart biopotentials, significant positive effects were observed including an increase in the power of EEG alpha-rhythm, an increase in self-assessments of well-being and mood, and a decrease in the level of emotional disadaptation of subjects. The increased effectiveness of the tested neurointerface may be explained by the active involvement of integrative mechanisms of the central nervous system in the processes of perception and processing of significant to human interoceptive signals.

Keywords: neurofeedback, brain-computer interface, complex feedback, electroencephalogram (EEG), heart rate variability (HRV), functional state correction