

# НЕЙРОИНТЕРФЕЙС С ДВОЙНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ОТ ЭЭГ В КОРРЕКЦИИ СТРЕСС-ВЫЗВАННЫХ РАССТРОЙСТВ

DOI: 10.17691/stm2019.11.1.17

УДК 159.96:616.8–073.43

Поступила 8.11.2018 г.



**А.И. Федотчев**, д.б.н., ведущий научный сотрудник лаборатории механизмов рецепции<sup>1</sup>;  
**А.А. Земляная**, к.м.н., старший научный сотрудник отделения экзогенно-органических расстройств и эпилепсии<sup>2</sup>;  
**Л.В. Савчук**, аспирант кафедры психофизиологии<sup>3</sup>; младший научный сотрудник отдела нейрофизиологии ЦНИЛ<sup>4</sup>;  
**С.А. Полевая**, д.б.н., зав. отделом нейрофизиологии ЦНИЛ<sup>4</sup>; зав. кафедрой психофизиологии<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт биофизики клетки РАН, ул. Институтская, 3, Пущино, Московская область, 142290;

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

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, проспект Гагарина, 23, Н. Новгород, 603950;

<sup>4</sup>Приволжский исследовательский медицинский университет, пл. Минина и Пожарского, 10/1, Н. Новгород, 603005

**Цель исследования** — сравнительная оценка эффективности нейроинтерфейсов, использующих одинарную (звуковую) и двойную (светозвуковую) обратную связь от ЭЭГ человека при подавлении стресс-индуцированных состояний.

**Материалы и методы.** В одном из трех обследований 16 испытуемым-добровольцам, находящимся в состоянии стресса, предъявляли классические музыкальные произведения (контроль). В двух других обследованиях использовали либо одинарную обратную связь, при которой испытуемым предъявляли звуковые стимулы, получаемые путем преобразования текущих значений ЭЭГ-осцилляторов в музыкаподобные сигналы, либо двойную обратную связь от ЭЭГ, при которой эти музыкаподобные сигналы дополнялись ритмическими световыми воздействиями, управляемыми суммарной ЭЭГ испытуемого.

**Результаты.** Наиболее выраженные эффекты — достоверное увеличение мощности альфа-ритма ЭЭГ относительно фона и значимые позитивные сдвиги в субъективных показателях состояния — отмечены при удвоении обратной связи от ЭЭГ-характеристик испытуемых благодаря вовлечению интегративных, адаптационных и резонансных механизмов деятельности центральной нервной системы в процессы нормализации функционального состояния.

**Заключение.** Использование двойной аудиовизуальной обратной связи от ЭЭГ человека представляется перспективным путем повышения эффективности нейроинтерфейсов при коррекции стресс-вызванных функциональных состояний.

**Ключевые слова:** нейроинтерфейс; электроэнцефалограмма; ЭЭГ; двойная обратная связь от ЭЭГ; трансформация ЭЭГ в музыкаподобные сигналы; фотостимуляция, управляемая биопотенциалами мозга; коррекция функциональных расстройств.

**Как цитировать:** Fedotchev A.I., Zemlyanaya A.A., Savchuk L.V., Polevaya S.A. Neurointerface with double feedback from subject's EEG for correction of stress-induced states. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2019; 11(1): 150–154, <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.17>

English

## Neurointerface with Double Feedback from Subject's EEG for Correction of Stress-Induced States

**A.I. Fedotchev**, DSc, Leading Researcher, Laboratory of Reception Mechanisms<sup>1</sup>;

**A.A. Zemlyanaya**, PhD, Senior Researcher, Department of Exogenous-Organic Disorders and Epilepsy<sup>2</sup>;

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

L.V. Savchuk, PhD Student, Department of Psychophysiology<sup>3</sup>; Junior Researcher, Department of Neurophysiology, Central Scientific Research Laboratory<sup>4</sup>;  
S.A. Polevaya, DSc, Head of the Department of Neurophysiology, Central Scientific Research Laboratory<sup>4</sup>;  
Head of the Department of Psychophysiology<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Moscow Research Institute of Psychiatry, Branch of the V. Serbsky Federal Medical Research Centre of Psychiatry and Narcology, Ministry of Health of the Russian Federation, Bldg 10, 3 Poteshnaya St., Moscow, 107076, Russia;

<sup>3</sup>National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod, 603950, Russia;

<sup>4</sup>Privolzhsky Research Medical University, 10/1 Minin and Pozharsky Square, Nizhny Novgorod, 603005, Russia

**The aim of the study** is a comparative evaluation of the effectiveness of the neurointerfaces using single (sound) or double (light-sound) feedback from the human EEG when suppressing stress-induced states.

**Materials and Methods.** In one of the three experiments, 16 stressed volunteers were presented with classical music (control). In the other two experiments, either single feedback was used, in which subjects are presented with sound stimuli obtained by converting the current values of EEG oscillators into music-like signals, or double feedback, in which the described music-like signals were supplemented by rhythmic light stimuli controlled by the raw EEG of the subject.

**Results.** The most pronounced effects — a significant increase in the alpha EEG power relative to the background and significant positive shifts in subjective indicators — were noted under double feedback from subject's EEG due to the involvement of integrative, adaptive and resonance mechanisms of the central nervous system in the processes of functional state normalization.

**Conclusion.** The use of the double audio-visual feedback from the human EEG appears to be a promising way to improve the effectiveness of neurointerfaces in correcting stress-induced functional states.

**Key words:** neurointerface; electroencephalogram; EEG; double feedback; EEG transformation into music-like signals; photostimulation, controlled by brain biopotentials; correction of functional disorders.

## Введение

Технологии нейроинтерфейсов, включая интерфейс мозг–компьютер и нейробиоуправление, в последнее время широко применяются для подавления стресс-индуцированных состояний [1–4]. Однако результативность существующих разработок пока недостаточна и часто подвергается обоснованной критике [5, 6]. Как показывает анализ литературы, для увеличения эффективности нейроинтерфейсов необходима оптимальная организация сигналов обратной связи от биоэлектрических процессов человека [7].

Ранее с этой целью был теоретически обоснован подход, предполагающий применение музыкальных или музыкоподобных сигналов обратной связи от ЭЭГ, что облегчает их восприятие и способствует увеличению эффективности лечебных воздействий [8]. Данный подход был успешно опробован для коррекции стресс-индуцированных расстройств путем музыкальных воздействий, управляемых ЭЭГ-осцилляторами субъекта [9], а также путем трансформации биопотенциалов мозга в музыкоподобные сигналы обратной связи [10].

Еще одним подходом к увеличению эффективности нейроинтерфейсов может быть удвоение обратной связи от ЭЭГ, при котором одни характеристики ЭЭГ преобразуются в звуковые (музыкоподобные), а другие — в световые воздействия. Такое предположение основано на известном факте, что бисенсорная обрат-

ная связь от ЭЭГ в большей степени соответствует условиям повседневной жизни, где обычно происходит одновременная обработка разномодальных сигналов [11], и может иметь определенные преимущества.

**Цель исследования** заключалась в экспериментальной проверке данного предположения путем сравнительного анализа эффектов, наблюдаемых при подавлении стресс-индуцированных состояний с помощью нейроинтерфейсов, использующих одинарную (звуковую) или двойную (светозвуковую) обратную связь от ЭЭГ. В качестве контроля использовали простое прослушивание музыкальных произведений.

## Материалы и методы

В исследовании приняли участие 16 испытуемых — сотрудников Пущинского научного центра РАН — в возрасте от 18 до 60 лет, обратившихся в кабинет психологической разгрузки по поводу состояний психоэмоционального напряжения и стресса и добровольно согласившихся на участие в трех обследованиях.

Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией (2013) и одобрено Этическим комитетом Института биофизики клетки РАН. От каждого испытуемого получено информированное согласие.

В начале каждого обследования для оценки психофизиологического состояния участников исследования проводили их начальное тестирование с использованием трех тестов:

«САН», в котором испытуемые дают оценку своему текущему самочувствию, активности и настроению [12];

«УЭД», дающего возможность определять текущий уровень эмоциональной дезадаптации [13];

«УС», представляющего собой модификацию теста «УЭД», которая позволяет оценивать уровень стрессированности человека [14]. В данном тесте вместо прилагательных, характеризующих степень эмоциональной дезадаптации, использованы прилагательные, описывающие уровень стресса.

После начального тестирования на испытуемых устанавливали ЭЭГ-датчики (активный электрод в отведении Cz, референтный и заземляющий — на мочках ушей), стереонаушники (Philips SBC HL140; уровень звука — 0–40 дБ, частота — 100–2000 Гц) и очки, в затемненные линзы которых были вмонтированы красные светодиоды с мощностью, не превышающей 100 мкВт. Испытуемых просили сидеть спокойно с закрытыми глазами в течение всех обследований. Каждый эксперимент начинался с 30-секундной записи фоновой электрической активности при диапазоне фильтрации ЭЭГ 2–32 Гц и частоте дискретизации сигналов 100 Гц.

Дальнейший ход обследования зависел от условий эксперимента, которые для каждого испытуемого чередовались в случайном порядке.

В эксперименте со звуковой обратной связью от ЭЭГ (серия «Звук») во время записи фона определяли доминирующий у данного испытуемого узкополосный (0,4–0,6 Гц) спектральный компонент в диапазоне альфа-ритма (8–13 Гц) ЭЭГ. Затем на 10 мин включали рабочий режим, где текущая амплитуда выявленного ЭЭГ-осциллятора преобразовывалась в музыкалоподобные сигналы, по тембру напоминающие звуки флейты, которые плавно варьировали по высоте тона и интенсивности в соответствии с текущей амплитудой ЭЭГ-

осциллятора и сопровождалась слабыми щелчками с частотой 1 Гц.

В эксперименте с двойной обратной связью от ЭЭГ (серия «Звук + свет») описанная звуковая стимуляция дополнялась варьирующими по интенсивности светодиодными воздействиями, которые осуществлялись в строгом соответствии с текущими значениями суммарной 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 контрольном эксперименте без обратной связи от ЭЭГ (серия «Контроль») испытуемым предъявляли 10-минутную композицию из популярных классических произведений Чайковского, Моцарта, Баха и Шуберта, заранее записанную на жесткий диск компьютера.

В конце каждого эксперимента регистрацию ЭЭГ продолжали в течение 2 мин для измерения эффектов последствия, а также проводили повторное тестирование и опрос испытуемых об их ощущениях во время лечебных сеансов.

Статистическую обработку результатов выполняли с помощью пакета программ «Сигма-Плот 11.0». Вычисляли средние для групп значения показателей (M) и стандартные ошибки (m). Для определения уровней значимости различий каждого показателя до и после воздействия использовали непараметрический критерий знаковых рангов для малых выборок Вилкоксона–Манна–Уитни.

**Результаты**

Оценка эффектов воздействий в контрольной (прослушивание музыки без обратной связи) и двух экспериментальных сериях («Звук» и «Звук + свет») прово-

**Показатели, зарегистрированные до и после воздействия в трех сериях экспериментов, в баллах (M±m)**

Показатели	Серия					
	Контроль — прослушивание музыки		Звуковая обратная связь от ЭЭГ-осциллятора		Двойная аудиовизуальная обратная связь от ЭЭГ	
	до	после	до	после	до	после
Альфа-ритм ЭЭГ, отн. ед.	117,0±11,0	123,0±12,0	120,0±10,0	151,0±11,0	118,0±10,0	154,0±12,0
Тест «САН» — самочувствие	46,1±0,9	45,2±0,8	46,5±1,1	50,6±1,1	46,5±1,2	51,6±1,5
Тест «САН» — активность	42,1±0,8	41,6±1,1	43,7±1,0	44,7±1,0	42,9±1,0	44,0±1,3
Тест «САН» — настроение	47,1±0,5	47,5±0,7	49,1±1,2	51,8±1,0	46,4±1,2	51,2±1,3
Тест «УЭД» — эмоциональная дезадаптация	1,7±0,3	1,2±0,3	1,7±0,3	1,2±0,3	1,8±0,3	0,9±0,1
Тест «УС» — уровень стресса	1,3±0,4	1,2±0,4	1,2±0,3	0,6±0,2	1,4±0,4	0,4±0,2

Примечание: жирным шрифтом выделены сравниваемые пары величин со статистически значимым уровнем различий, p<0,05.

дидась путем сопоставления основных показателей, зарегистрированных перед началом и после воздействия (см. таблицу).

Данные таблицы показывают, что под влиянием всех лечебных процедур мощность альфа-активности ЭЭГ увеличивается. Однако достоверный прирост мощности альфа-ритма отмечен только в экспериментальных сериях с наличием обратной связи от ЭЭГ и был более значительным при двойной светозвуковой обратной связи. Можно также видеть, что в результате лечебных процедур с обратной связью от ЭЭГ происходят позитивные изменения в субъективных оценках состояния испытуемых, проявившиеся в достоверном увеличении показателей самочувствия и настроения в тесте «САН». Под влиянием всех трех лечебных процедур отмечено снижение уровней эмоциональной дезадаптации и стрессированности испытуемых. Однако эти изменения достигли уровня значимости только в серии с двойной обратной связью от ЭЭГ.

Распрос испытуемых о субъективных ощущениях в ходе экспериментов выявил их положительное отношение к проведенным лечебным сеансам, снижение уровня стресса и улучшение эмоционального состояния. Особенно позитивно были оценены эксперименты с двойной обратной связью от ЭЭГ, где музыкаподобные звуковые стимулы дополнялись приятными переливами разноцветного фона, возникающими при восприятии через закрытые глаза световых мельканий, формируемых на основе ЭЭГ.

## Обсуждение

Полученные данные демонстрируют, что значимые позитивные сдвиги объективных и субъективных показателей наблюдаются только при наличии обратной связи от ЭЭГ, т.е. когда управление сенсорными воздействиями осуществляется непосредственно регистрируемыми ЭЭГ характеристиками испытуемых. В этих случаях отмечается существенный рост мощности альфа-ритма ЭЭГ относительно фона, сопровождаемый позитивными эмоциональными реакциями и сдвигами функционального состояния испытуемых.

Ранее нами было показано [15], что преобразование текущих значений ЭЭГ-осцилляторов пациента в музыкаподобные сигналы обеспечивает возможность быстрой и эффективной коррекции неблагоприятных сдвигов его функционального состояния. Судя по полученным в настоящем исследовании результатам, удвоение обратной связи от ЭЭГ-характеристик испытуемых путем введения дополнительного контура световой стимуляции, управляемой биопотенциалами мозга, приводит к увеличению эффективности лечебных воздействий за счет резонансного взаимодействия между световыми ритмическими раздражениями и биоэлектрическими процессами мозга человека. Известно, что ритмическая фотостимуляция с частотами эндогенных ЭЭГ-ритмов вызывает резонансные ответы зрительных областей коры по механизму во-

влечения (захвата фазы) осцилляций биопотенциалов мозга ритмическими сенсорными раздражениями и сопровождается выраженными поведенческими эффектами [16].

Важно подчеркнуть, что использованная нами двойная обратная связь от ЭЭГ соответствует современным тенденциям в развитии технологий нейроинтерфейсов, предполагающим перспективность создания гибридных или мультисенсорных нейроинтерфейсов [17]. В литературе указывается, что такие нейроинтерфейсы обладают целым рядом преимуществ, включая обогащение обратной связи [18], увеличение количества управляющих команд [19] и более активное вовлечение субъекта в реабилитационные процессы [20].

## Заключение

Удвоение обратной связи от ЭЭГ-характеристик испытуемых, при котором преобразование текущих значений ЭЭГ-осцилляторов пациента в музыкаподобные сигналы дополняется ритмическими световыми воздействиями, управляемыми суммарной ЭЭГ, представляется перспективным путем повышения эффективности процедур биоуправления для коррекции стресс-вызванных функциональных нарушений. При таких воздействиях создаются оптимальные условия для вовлечения интеграционных, адаптационных и резонансных механизмов деятельности центральной нервной системы в процессы нормализации функционального состояния.

**Финансирование исследования.** Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №18-013-01225, 18-413-520006, 19-013-00095).

**Конфликт интересов.** Авторы подтверждают отсутствие финансовых и других конфликтных интересов, способных оказать влияние на их работу.

## Литература/References

1. 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>.
2. Dillon A., Kelly M., Robertson I.H., Robertson D.A. Smartphone applications utilizing biofeedback can aid stress reduction. *Front Psychol* 2016; 7: 832, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00832>.
3. Phneah S.W., Nisar H. EEG-based alpha neurofeedback training for mood enhancement. *Australas Phys Eng Sci Med* 2017; 40(2): 325–336, <https://doi.org/10.1007/s13246-017-0538-2>.
4. Subhani A.R., Kamel N., Mohamad Saad M.N., Nandagopal N., Kang K., Malik A.S. Mitigation of stress: new treatment alternatives. *Cogn Neurodyn* 2018; 12(1): 1–20, <https://doi.org/10.1007/s11571-017-9460-2>.
5. Thibault R.T., Lifshitz M., Raz A. The self-regulating



brain and neurofeedback: experimental science and clinical promise. *Cortex* 2015; 74: 247–261, <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.10.024>.

6. Slutzky M.W., Flint R.D. Physiological properties of brain-machine interface input signals. *J Neurophysiol* 2017; 118(2): 1329–1343, <https://doi.org/10.1152/jn.00070.2017>.

7. Fedotchev A.I., Parin S.B., Polevaya S.A., Velikova S.D. Brain-computer interface and neurofeedback technologies: current state, problems and clinical prospects (review). *Sovremennye tehnologii v medicine* 2017; 9(1): 175, <https://doi.org/10.17691/stm2017.9.1.22>.

8. Федотчев А.И., Радченко Г.С. Музыкальная терапия и «музыка мозга»: состояние, проблемы и перспективы исследований. Успехи физиологических наук 2013; 44(4): 35–50. Fedotchev A.I., Radchenko G.S. Music therapy and “brain music” state of the art, problems and perspectives problems and perspectives. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk* 2013; 44(4): 35–50.

9. Fedotchev A.I., Oh S.J., Semikin G.I. Combination of neurofeedback technique with music therapy for effective correction of stress-induced disorders. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2014; 6(3): 60–63.

10. Fedotchev A.I., Bondar A.T., Bakhchina A.V., Grigorieva V.N., Katayev A.A., Parin S.B., Radchenko G.S., Polevaya S.A. Transformation of patient’s EEG oscillators into music-like signals for correction of stress-induced functional states. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2016; 8(1): 93, <https://doi.org/10.17691/stm2016.8.1.12>.

11. Roy C., Lagarde J., Dotov D., Dalla Bella S. Walking to a multisensory beat. *Brain Cogn* 2017; 113: 172–183, <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.02.002>.

12. Доскин В.А., Лаврентьева Н.А., Мирошников М.Н., Шарай В.В. Тест дифференцированной самооценки функционального состояния. Вопросы психологии 1973; 19(6): 141–145. Doskin V.A., Lavrent’eva N.A., Miroshnikov M.N., Sharay V.V. Test for differential self-assessment of functional state. *Voprosy psikhologii* 1973; 19(6): 141–145.

13. Григорьева В.М., Тхостов А.Ш. Способ оценки эмоционального состояния человека. Патент РФ 2291720 С1. 2007. Grigorieva V.M., Tkhostov A.Sh. *Method for assessing human emotional state*. Patent RU 2291720 C1. 2007.

14. Катаев А.А., Бахчина А.В., Полевая С.А., Федотчев А.И. Связь между субъективными и объективными оценками функционального состояния человека (апробация методики экспресс-оценки уровня стрессированности). Вестник психофизиологии 2017; 2: 62–68. Kataev A.A., Bakhchina A.V., Polevaya S.A., Fedotchev A.I. Connection between subjective and objective estimates of human functional state (approbation of rapid test for measurement of stress level). *Vestnik psikhofiziologii* 2017; 2: 62–68.

15. 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; 47(1): 69–79. Fedotchev A.I., Bondar’ A.T., Bakhchina A.V., Parin S.B., Polevaya S.A., Radchenko G.S. Music-acoustic signals controlled by subject’s brain potentials in the correction of unfavorable functional states. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk* 2016; 47(1): 69–79.

16. de Graaf T.A., Gross J., Paterson G., Rusch T., Sack A.T., Thut G. Alpha-band rhythms in visual task performance: phase-locking by rhythmic sensory stimulation. *PLoS One* 2013; 8(3): e60035, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060035>.

17. 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; 12(4): e0176674, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176674>.

18. 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, <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.06.004>.

19. 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; 11: 35, <https://doi.org/10.3389/fnbot.2017.00035>.

20. 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, <https://doi.org/10.1109/tnsre.2017.2703586>.