

ЭФФЕКТЫ ФОТОСТИМУЛЯЦИИ, УПРАВЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММОЙ ЧЕЛОВЕКА

© 2019 г. А.И. Федотчев

Институт биофизики клетки РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра
«Пуцинский научный центр биологических исследований РАН»,
142290, Пушкино Московской области, ул. Институтская, 3

E-mail: fedotchev@mail.ru

Поступила в редакцию 07.12.18 г.

После доработки 07.12.18 г.

Принята к публикации 20.12.18 г.

Экспериментально проверено предположение о том, что ритмические световые воздействия могут обладать повышенной биологической эффективностью при их автоматической модуляции параметрами электроэнцефалограммы человека. Проведен сравнительный анализ эффектов, наблюдаемых у одних и тех же испытуемых при двух видах ритмической фотостимуляции. В одном случае 15-ти испытуемым-добровольцам, находящимся в состоянии тревоги и стресса, предъявляли световые ритмические воздействия, формируемые в реальном времени на основе их электроэнцефалограммы, а в другом случае (контроль) использовали фотостимуляцию с пошагово возрастающей от 4 до 25 Гц частотой. Показано, что значимые позитивные сдвиги объективных и субъективных показателей наблюдаются только в случаях, когда управление световыми воздействиями осуществляется непосредственно регистрируемыми электроэнцефалограммными характеристиками испытуемых. Полученные эффекты объясняются повышенной персонализацией воздействий, а также взаимодействием процессов восприятия и обработки значимых для человека интероцептивных сигналов с резонансными механизмами мозга, обеспечивающими нормализацию функционального состояния человека под влиянием ритмических световых воздействий.

Ключевые слова: ритмическая фотостимуляция, частота стимуляции, электроэнцефалограмма человека, обратная связь, модуляция, эффективность воздействий.

DOI: 10.1134/S0006302919020157

Ритмические световые воздействия широко применяются как один из способов системной реабилитации человека в спортивной медицине [1] и в неврологической практике как функциональная нагрузка, помогающая диагностировать различные патологические состояния мозга [2] и адекватно выбирать лечение конкретного пациента, имеющего сосудистую патологию головного мозга [3]. В связи с широким спектром практического применения активно продолжаются поиски наиболее эффективных параметров ритмической фотостимуляции, включая частоту [4] и цветовой состав мелькающего света [5], проводятся модельные исследования, направленные на создание теоретического базиса для мониторинга и коррекции функционального состояния человека-оператора с помощью ритмической фотостимуляции в человеко-машинных комплексах [6].

Ранее нами было показано, что при частотах ритмической фотостимуляции, которые совпадают с основными ритмами электроэнцефалограммы (ЭЭГ) человека, такими как тета- (4–7 Гц), альфа- (8–12 Гц) и бета-ритмы (13–25 Гц), наблюдаются стабильные резонансные эффекты в виде резкого усиления выраженности этих ритмических компонентов ЭЭГ [7]. Полученные данные позволили предположить, что ритмические световые воздействия при их модуляции непосредственно регистрируемыми биопотенциалами мозга человека могут обладать повышенной биологической эффективностью [8].

Прямая проверка данного предположения может быть осуществлена путем сопоставления эффектов, наблюдаемых при ритмической фотостимуляции с наличием и отсутствием обратной связи от ЭЭГ человека. К настоящему времени практически все исследования эффектов фотостимуляции, в том числе выше про-

Сокращение: ЭЭГ – электроэнцефалограмма.

цитированные работы [1–8], выполнены без использования обратной связи от ЭЭГ. Исследования эффектов фотостимуляции с замкнутым контуром обратной связи от ЭЭГ человека пока немногочисленны [9–11], а литературных данных о прямом сравнении эффектов фотостимуляции при отсутствии и наличии обратной связи от ЭЭГ мы не встретили.

Целью настоящей работы был сравнительный анализ эффектов, наблюдаемых у одних и тех же испытуемых при двух видах ритмической фотостимуляции – с наличием и отсутствием управляющих сигналов обратной связи от ЭЭГ. В одном случае испытуемым-добровольцам, находящимся в состоянии стресса, предъявляли световые ритмические воздействия, формируемые в реальном времени на основе их ЭЭГ, а в другом случае (контроль) использовали фотостимуляцию с частотой, плавно изменяющейся в диапазоне основных ритмов ЭЭГ человека (4–25 Гц).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 15 испытуемых (семь женщин и восемь мужчин в возрасте от 23 до 55 лет), сотрудников Пущинского научного центра РАН, которые находились в состоянии тревоги и стресса в связи со срочной сдачей отчета и добровольно согласились на участие в двух обследованиях. 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 исходного психофизиологического состояния испытуемых проводили их краткий опрос и начальное тестирование с помощью трех ранее апробированных [12] тестов: теста «САН», в котором испытуемые дают оценку своего текущего самочувствия, активности и настроения, теста «УЭД», дающего возможность определять текущий уровень эмоциональной дезадаптации, и теста «УС», позволяющего оценивать уровень стрессированности человека.

Затем устанавливали ЭЭГ-датчики (активный электрод в отведении Cz, референтный и заземляющий электроды – на мочках ушей) 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 всей процедуры.

Эксперимент начинался с 30-секундной записи фоновой электрической активности при диапазоне фильтрации ЭЭГ 2–32 Гц и частоте дискретизации сигналов 100 Гц. Затем на 10 мин включался рабочий режим, где испытуемым предъявляли ритмические светодиодные воздействия. При проведении процедур фотостимуляции учитывали современные рекомендации Европейской противоэпилептической лиги [13].

В одном из двух обследований эти воздействия осуществляли в строгом соответствии с текущими значениями 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 другом обследовании того же испытуемого ему предъявляли световые раздражители с частотой, пошагово возрастающей от 4 до 25 Гц по ранее описанной методике [14]. По окончании каждого эксперимента испытуемых спрашивали об отмеченных эффектах, а также повторно проводили психофизиологическое тестирование.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ «Sigma Plot 11.0». Использовали парный *t*-тест, позволяющий определять сдвиги показателей после воздействия относительно фона и оценивать уровни значимости *P* этих сдвигов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При определении эффектов воздействий для каждого эксперимента определяли средние изменения мощности ЭЭГ-ритмов при стимуляции относительно исходного фона, а также изменения показателей тестов САН, УЭД и УС в результате воздействий. Полученные данные представлены в таблице. Они показывают, что под влиянием обоих видов фотостимуляции происходит увеличение мощности основных ЭЭГ-ритмов. Однако значимые приросты мощности альфа- и бета-ритмов ЭЭГ отмечаются только при фотостимуляции, управляемой ЭЭГ испытуемого.

При анализе результатов начального и повторного психологического тестирования выяснилось, что достоверные положительные изменения показателей самочувствия, активности и настроения, а также снижение уровней дезадаптации и стрессированности после процедуры относительно исходных значений наблюдаются только в экспериментах с фотостимуляцией, управляемой ЭЭГ испытуемого, а в контроле

Средние величины сдвигов показателей под влиянием фотостимуляции относительно исходных значений и уровни значимости P этих сдвигов в контрольной и экспериментальной сериях

Показатель	Серия			
	Контроль – фотостимуляция с заданной частотой		Опыт – фотостимуляция, управляемая ЭЭГ испытуемого	
	Сдвиг	P	Сдвиг	P
Мощность тета-ритма ЭЭГ, отн. ед.	8,0 ± 4,8	0,119	12,7 ± 6,0	0,052
Мощность альфа-ритма ЭЭГ, отн. ед.	17,0 ± 8,5	0,068	34,6 ± 9,4	0,003
Мощность бета-ритма ЭЭГ, отн. ед.	6,2 ± 3,1	0,071	12,8 ± 3,8	0,005
Тест «САН» – самочувствие, баллы	2,0 ± 1,1	0,090	4,4 ± 0,9	0,001
Тест «САН» – активность, баллы	-1,6 ± 1,3	0,235	3,0 ± 1,3	0,042
Тест «САН» – настроение, баллы	0,6 ± 0,7	0,391	3,6 ± 0,7	0,001
Тест «УЭД» – эмоциональная дезадаптация, баллы	-0,1 ± 0,3	0,808	-1,0 ± 0,3	0,006
Тест «УС» – уровень стрессированности, баллы	0,1 ± 0,1	0,719	-0,9 ± 0,2	0,005

Примечание: жирным шрифтом выделены величины сдвигов с уровнем значимости различий $P < 0,05$.

отмечены лишь небольшие сдвиги этих показателей относительно исходного уровня.

Расспрос испытуемых о субъективных ощущениях во время фотостимуляции показал, что использованные два вида воздействий характеризовались некоторыми особенностями, обусловленными восприятием световых мельканий через закрытые глаза. При предъявлении фотостимуляции, управляемой ЭЭГ субъекта, большинство испытуемых сообщали о приятных переливах разноцветного фона, как бы вовлекающих их в калейдоскоп образов и вызывающих позитивные эмоциональные реакции. При фотостимуляции с заданной возрастающей частотой испытуемые сообщали о постепенном изменении цветового фона, не вызывающем каких-либо выраженных эмоциональных реакций.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные демонстрируют, что под влиянием обоих видов фотостимуляции происходит увеличение выраженности основных ритмов ЭЭГ. Вероятнее всего, в основе этих эффектов лежат резонансные механизмы деятельности мозга [15], оптимальное вовлечение которых достигается в случаях, когда управление световыми воздействиями осуществляется непосредственно регистрируемыми биопотенциалами мозга испытуемых.

Преимущества модуляции сенсорных воздействий собственными ритмами человека ранее были отмечены в пионерских исследованиях Н.П. Бехтеревой [16], которая считала такие

воздействия «очень щадящими, очень эффективными и аналогичными собственным защитным механизмам мозга и организма» [17]. Впоследствии данная линия исследований получила развитие в перспективном направлении нейрофизиологии, получившем название «нейробиоуправление с обратной связью» (closed-loop neurofeedback), в котором различные сенсорные воздействия автоматически подстраиваются под текущие биоэлектрические процессы человека [18]. Показано, что такие воздействия обеспечивают более точное и персонализированное лечение психогенных расстройств [19].

Важную роль в обнаруженных нами эффектах фотостимуляции, автоматически управляемой ЭЭГ испытуемых, могут играть также интероцептивные сигналы обратной связи от их мозга. Известно, что восприятие интероцептивных сигналов обратной связи о состоянии организма благодаря динамическому взаимодействию между телом, мозгом и психикой может обеспечивать улучшение физического и психического здоровья человека [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В контролируемых экспериментах исследован вопрос о биологической эффективности фотостимуляции, модулируемой ЭЭГ человека. Экспериментально установлено, что достоверное увеличение мощности ЭЭГ и позитивные сдвиги субъективных показателей наблюдаются только в случаях, когда управление световыми воздействиями осуществляется непосредственно

регистрируемыми текущими ЭЭГ характеристиками испытуемых.

Полученные данные объясняются вовлечением процессов восприятия и обработки значимых для человека interoceptивных сигналов в резонансные механизмы мозга, обеспечивающие нормализацию функционального состояния человека под влиянием ритмических световых воздействий. Они могут быть использованы для разработки перспективных методов сенсорных лечебных воздействий, направленных на своевременное устранение функциональных нарушений и возвращение организма к оптимальному состоянию.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. В. Арьков, А. П. Козловский, Н. В. Кузнецова и З. Г. Орджоникидзе, Лечебная физкультура и спортивная медицина, № 10, 16 (2011).
2. Л. Ю. Глухова, К. Ю. Мухин, М. А. Никитина и др., Рус. журн. детской неврологии **8** (3), 15 (2013).
3. И. А. Святогор, О. Е. Дик, А. Д. Ноздрачев и Н. Л. Гусева, Физиология человека **41** (3), 41 (2015).
4. Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин, А. А. Вахтин и др., Биофизика **60** (3), 547 (2015).
5. М. В. Яценко и Н. З. Кайгородова, Мир науки **5** (1), 1 (2017).
6. М. Я. Брагинский, Ю. Г. Бурькин и Д. В. Тараканов, Вестн. кибернетики, № 1, 63 (2016).
7. A. I. Fedotchev, A. T. Bondar, and V. F. Kononov, Int. J. Psychophysiol. **9** (2), 189 (1990).
8. А. И. Федотчев, Биофизика **41** (3), 718 (1996).
9. H. Kumano, H. Horie, T. Shidara, et al., Biofeedback Self Regul. **21**, 323 (1996).
10. А. Я. Каплан и А. Ю. Жигалов, Бюл. Сибирской медицины **9** (2), 7 (2010).
11. A. Zhigalov, A. Kaplan, and J. M. Palva, Clin. Neurophysiol. **127** (8), 2882 (2016).
12. А. А. Катаев, А. В. Бахчина, С. А. Полевая и А. И. Федотчев, Вестн. психофизиологии, № 2, 62 (2017).
13. T. D. Kasteleijn-Nolst, G. Rubboli, E. Hirsch, et al., Epilepsia **53** (1), 16 (2012).
14. А. И. Федотчев, Биофизика **46** (1), 112 (2001).
15. А. И. Федотчев, А. Т. Бондарь и В. С. Семёнов, Физиология человека **42** (4), 38 (2016).
16. Н. П. Бехтерева и В. В. Усов, Физиол. журн. **46** (1), 108 (1960).
17. Н. П. Бехтерева, *Электрическая стимуляция мозга и нервов у человека* (Наука, Л., 1990).
18. R. Sitaram, T. Ros, L. Stoeckel, et al., Nat. Rev. Neurosci. **18** (2), 86 (2017).
19. M. C. Lo and A. S. Widge, Int. Rev. Psychiatry **29** (2), 191 (2017).
20. L. Quadt, H. D. Critchley, and S. N. Garfinkel, Ann. N. Y. Acad. Sci. **1428** (1), 112 (2018).

The Effects of Photostimulation, Controlled via Human Electroencephalogram

A.I. Fedotchev

*Institute of Cell Biophysics – Division of Federal Research Center
“Pushchino Scientific Center of Biological Investigations” of the Russian Academy of Sciences,
Institutskaya ul. 3, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia*

The assumption that rhythmic light stimulation can have an increased biological efficiency when modulated by human electroencephalogram is tested experimentally. A comparative analysis of the effects observed in the same subjects with two types of rhythmic photostimulation was carried out. In one case, 15 volunteer subjects in stress/anxiety states were exposed to light rhythmic stimuli formed in real time on the basis of their electroencephalograms, and in another case (control) rhythmic photostimulation was used with a frequency linearly changed from 4 to 25 Hz. It is shown that significant positive shifts of objective and subjective indicators are observed only in cases when the management of light stimulation is performed directly via the subject's electroencephalogram. The obtained effects are explained by the increased personalization of electroencephalogram-derived stimulation, as well as by involvement of interoceptive processes into the resonance mechanisms of the brain, ensuring normalization of the human functional state under electroencephalogram-derived rhythmic light stimulation.

Keywords: rhythmic photostimulation, stimulation frequency, human electroencephalogram, feedback, modulation, efficiency of stimulation