

УДК 612.821:612.822.3

ЭФФЕКТЫ АУДИО-ВИЗУАЛЬНОЙ СТИМУЛЯЦИИ, АВТОМАТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОЙ БИОПОТЕНЦИАЛАМИ МОЗГА И СЕРДЦА ЧЕЛОВЕКА

© 2019 г. А. И. Федотчев¹*, С. Б. Парин², С. А. Полевая³, А. А. Земляная⁴

¹ФГБУН Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Московская область, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

³Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Россия

⁴Московский научно-исследовательский институт психиатрии – филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр психиатрии и наркологии им. В.П. Сербского Минздрава России, Москва, Россия

*E-mail: fedotchev@mail.ru

Поступила в редакцию 05.12.2018 г.

После доработки 06.02.2019 г.

Принята к публикации 04.04.2019 г.

Проведен сравнительный анализ эффектов аудио-визуальной стимуляции (АВС) при введении и отсутствии управляющих сигналов обратной связи от биопотенциалов мозга и сердца испытуемых. В одном из двух обследований испытуемым-добровольцам предъявляли АВС в виде светомузыкальных воздействий, формируемых на основе текущих параметров их электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и ритма сердцебиений. В другом обследовании (контроль) использовали заранее подготовленные светомузыкальные воздействия, предъявляемые без обратной связи от текущей биоэлектрической активности испытуемых. Установлено, что наиболее выраженные сдвиги объективных и субъективных показателей, в том числе максимальный рост мощности α -ритма ЭЭГ относительно фона, положительные эмоциональные реакции и сдвиги функционального состояния организма, отмечаются в случаях, когда управление АВС осуществляется непосредственно регистрируемыми собственными электрофизиологическими характеристиками испытуемых. Выявленные эффекты объясняются вовлечением процессов восприятия и обработки, значимых для человека интероцептивных сигналов в механизмы мультисенсорной интеграции, нейропластичности и резонансные механизмы мозга, обеспечивающие нормализацию функционального состояния под влиянием АВС.

Ключевые слова: аудио-визуальная стимуляция (АВС), обратная связь, электроэнцефалограмма (ЭЭГ), ритм сердцебиений, интероцептивные сигналы, коррекция стресс-индуцированных состояний.

DOI: 10.1134/S0131164619050023

Аудио-визуальная стимуляция (АВС) – это воздействие звуковыми и световыми стимулами на частоте биоритмов мозга, позволяющее модулировать биологическую активность коры и функциональное состояние отдельных систем организма [1]. АВС является одним из перспективных методов нелекарственной коррекции функциональных нарушений [2] и успешно используется для нормализации психофизиологического состояния человека [3], в комплексной терапии психогенно обусловленных расстройств [4], при коррекции дезадаптивных психических состояний специалистов эстремальных профессий [5] и при лечении бессонницы у пожилых людей [6].

Различают два типа АВС: АВС с открытым контуром (*open-loop*) и АВС с замкнутым контуром (*closed-loop*) обратной связи от биоэлектрических процессов человека [7]. Первый тип харак-

теризуется простотой организации аудио-визуальных воздействий, параметры которых заранее подбираются в соответствии с определенными ритмическими процессами организма. Второй тип предполагает *on-line* регистрацию биопотенциалов мозга человека, обратная связь от которых используется для управления в реальном времени параметрами предъявляемых ему аудиовизуальных воздействий.

Анализ литературы показывает, что практически все исследования эффектов АВС, в том числе процитированные выше [1–7], выполнены с использованием первого типа воздействий (*open-loop*). В то же время в ряде публикаций указывается, что очень перспективным, но пока недостаточно изученным подходом к организации разных видов стимуляции является “*closed-loop*” методология, при которой сенсорные воздействия автома-

тически подстраиваются под текущие биоэлектрические процессы человека [8–10].

Ранее “closed-loop” методология была применена нами в двух исследованиях, посвященных коррекции стресс-индуцированных состояний человека с помощью раздельного предъявления световых и звуковых стимулов. В одном из них использовали световые воздействия, формируемые на основе ЭЭГ, и показали, 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 [11]. Во втором исследовании использовалась звуковая (музыкальная) стимуляция, управляемая сигналами обратной связи от биопотенциалов мозга и сердца испытуемых [12]. Было показано, что при управлении музыкальными воздействиями текущей амплитудой α -ЭЭГ осциллятора и сердечным ритмом испытуемого отмечаются значимые позитивные сдвиги оценок самочувствия и настроения, а также уменьшение уровня эмоциональной дезадаптации. Полученные результаты позволили предположить, что объединение этих двух подходов в виде АВС, автоматически управляемой биопотенциалами мозга и сердца, может иметь определенные преимущества по сравнению с раздельным предъявлением звуковой и световой стимуляции.

Задача данной работы заключалась в сравнительном анализе эффектов, наблюдаемых при подавлении стресс-индуцированных состояний аудио-визуальными воздействиями с наличием и отсутствием (контроль) обратной связи от биопотенциалов мозга и сердца испытуемых. В качестве контроля использовали заранее подготовленные светомызыкальные воздействия, предъявляемые без обратной связи от текущей биоэлектрической активности обследуемых.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 18 испытуемых (8 женщин и 10 мужчин в возрасте 48–65 лет), сотрудников Пущинского научного центра РАН, которые обратились в кабинет психологической разгрузки по поводу состояний психоэмоционального напряжения и стресса в связи со срочной сдачей отчета и добровольно согласились на участие в двух обследованиях.

В начале каждого обследования для оценки психофизиологического состояния испытуемых проводили их опрос и начальное тестирование с помощью трех ранее апробированных [13] тестов: 1) теста “САН”, в котором испытуемые дают оценку своего текущего самочувствия, активности и настроения, 2) теста “УЭД”, дающего воз-

можность определять текущий уровень эмоциональной дезадаптации, и 3) теста “УС”, представляющего собой модификацию теста “УЭД”, которая позволяет оценивать уровень стрессированности человека.

После начального тестирования устанавливали ЭЭГ-датчики (активный электрод в отведении Cz, референтный и заземляющий – на мочках ушей), стереонаушники (*Philips SBC HL140*) и очки, в затемненные линзы которых были вмонтированы красные светодиоды с мощностью, не превышающей 100 мкВт, а также оригинальную систему регистрации электрокардиограммы с *on-line* анализом показателей variability сердечного ритма [14]. Испытуемых просили сидеть спокойно с закрытыми глазами в течение всех обследований.

Каждый эксперимент начинали 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 [15], определяли доминирующий у данного испытуемого узкочастотный (0.4–0.6 Гц) спектральный компонент в диапазоне α -ритма (8–13 Гц) ЭЭГ.

Затем в одном из двух экспериментов (опыт), которые чередовали в случайном порядке и проводили с интервалом в 1–2 дня, на 10 мин включали рабочий режим, где испытуемым предъявляли аудио-визуальные воздействия, формируемые на основе биопотенциалов мозга и сердца. 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. Эти музыкаподобные стимулы, генерируемые на основе ЭЭГ, дополняли слабыми (порядка 10 дБ) звуковыми сигналами, формируемыми системой регистрации электрокардиограммы и соответствующими текущему ритму сердцебиений испытуемого. Одновременно осуществляли светодиодные воздействия в строгом соответствии с текущими 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 контрольном эксперименте без обратной связи испытуемым предъявляли 10-минутную композицию из популярных классических произведений Чайковского, Моцарта, Баха и Шуберта, заранее записанную на жесткий диск компьюте-

Таблица 1. Средние значения и стандартные отклонения сдвигов показателей в двух экспериментах, уровень значимости p этих сдвигов и достоверность различий (p) между сдвигами в опыте и контроле

Показатель	Эксперимент				p контр/опыт
	контроль		опыт		
	сдвиг	p	сдвиг	p	
Мощность α -ритма ЭЭГ (отн. ед.)	12.3 ± 23.5	0.042	22.9 ± 26.3	0.002	0.272
Тест “САН”-Самочувствие (баллы)	0.4 ± 4.6	0.725	5.0 ± 3.2	0.001	0.002
Тест “САН”-Активность (баллы)	0.3 ± 4.1	0.782	2.3 ± 5.3	0.079	0.224
Тест “САН”-Настроение (баллы)	1.1 ± 4.4	0.301	4.7 ± 2.2	0.001	0.014
Тест “УЭД”- эмоциональная дезадаптация (баллы)	-0.3 ± 1.8	0.523	-0.7 ± 1.2	0.023	0.367
“УС”- уровень стрессированности (баллы)	-0.1 ± 1.5	0.762	-0.9 ± 1.1	0.003	0.039

Примечание: жирным шрифтом выделены величины сдвигов с уровнем значимости $p < 0.05$.

ра. Прослушивание музыки сопровождалось световыми мельканиями с частотой, плавно уменьшающейся от 20 до 2 Гц.

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 проводили с помощью пакета программ “Сигма-Плот 11.0”. Использовали парный t -тест, позволяющий определять средние величины сдвигов (со знаком) показателей после воздействия относительно фона и оценивать уровни значимости p этих сдвигов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка эффектов воздействий в контрольном (АВС без обратной связи) и основном эксперименте (АВС с обратной связью) проводилась путем сопоставления средних величин сдвигов показателей под влиянием каждого воздействия. Полученные данные представлены в табл. 1.

По данным табл. 1 видно, что под влиянием обоих экспериментальных воздействий мощность α -активности ЭЭГ достоверно увеличивается. Однако в эксперименте с АВС, управляемой биопотенциалами мозга и сердца, прирост мощности α -ритма был более значительным. Можно также видеть, что в результате АВС с обратной связью от ЭЭГ и сердца происходят позитивные изменения в субъективных оценках состояния испытуемых, проявившиеся в достоверном увеличении показателей самочувствия и настроения в тесте САН. Под влиянием АВС с обратной связью от ЭЭГ и сердца отмечается также достоверное снижение уровней эмоциональной дезадаптации и стрессированности испытуемых.

Опрос испытуемых о субъективных ощущениях в ходе экспериментов выявил их положитель-

ное отношение к проведенным лечебным сеансам, снижение уровня стресса и улучшение эмоционального состояния. Большинство испытуемых (13 из 18) более позитивно оценили эксперименты с АВС, управляемой сигналами обратной связи от ЭЭГ и сердца, где музыкаподобные звуковые стимулы, сформированные путем трансформации ЭЭГ осциллятора и структурированные ритмом сердцебиений испытуемого, дополнялись плавными колебаниями разноцветного фона, возникающими при восприятии через закрытые глаза световых мельканий, формируемых на основе ЭЭГ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные демонстрируют, что оба вида АВС приводят к позитивным изменениям ряда показателей, в том числе к достоверному росту мощности α -ритма ЭЭГ. Вероятнее всего, в основе этих эффектов лежат процессы мульти-сенсорной интеграции [2, 16] и резонансные механизмы деятельности мозга [11], а также известные преимущества использования в лечебных процедурах музыкальных или музыкаподобных воздействий [17].

Наиболее выраженные сдвиги объективных и субъективных показателей зарегистрированы нами при наличии обратной связи от ЭЭГ и сердца, т.е. в случаях, когда управление АВС осуществлялось непосредственно регистрируемыми собственными электрофизиологическими характеристиками испытуемых в соответствии с “closed-loop” методологией. В этих случаях отмечен максимальный рост мощности α -ритма ЭЭГ относительно фона, сопровождаемый достоверным ростом оценок самочувствия и настроения, а также снижением уровня эмоциональной дезадаптации и стрессированности испытуемых.

Главную роль в обнаруженных нами эффектах АВС, автоматически управляемой биоэлектриче-

скими процессами испытуемых, могут играть инteroцептивные сигналы обратной связи от мозга и сердца. Известно, что восприятие interoцептивных сигналов обратной связи о состоянии организма благодаря динамическому взаимодействию между телом, мозгом и психикой может обеспечивать улучшение физического и психического здоровья человека [18]. Полученные результаты согласуются с данными литературы, согласно которым сенсорные воздействия, организованные по “closed-loop” методологии, обеспечивают более точное и персонализированное лечение психогенных расстройств [19]. По современным представлениям, эффективность таких воздействий может быть обусловлена процессами нейропластичности, основную роль в которых играет реорганизация корковых сетей, а не репарация тканей как таковая [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предпринятый сравнительный анализ показал, что введение в АВС управляющих сигналов обратной связи от биопотенциалов мозга и сердца испытуемых приводит к появлению эффектов, значительно превышающих уровень контроля, зарегистрированный в отсутствие обратной связи. Выявленные эффекты, включая максимальный рост мощности α -ритма ЭЭГ относительно фона, положительные сдвиги показателей самочувствия и настроения, а также снижение уровней эмоциональной дезадаптации и стрессированности объясняются вовлечением процессов восприятия и обработки значимых для человека interoцептивных сигналов в механизмы мультисенсорной интеграции, нейропластичности и резонансные механизмы мозга, обеспечивающие нормализацию функционального состояния под влиянием АВС.

Полученные данные после дополнительных исследований могут быть использованы для разработки перспективных методов персонализированного воздействия с помощью АВС, направленных на своевременное устранение функциональных нарушений и возвращение организма к оптимальному состоянию.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом Института биофизики клетки РАН (Пушино).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных

рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 18-013-01225, 18-413-520006, 19-013-00095).

Благодарности. Авторы выражают благодарность главному специалисту Института биофизики клетки РАН (Пушино) Виталию Семёновичу Семёнову за помощь в создании программного обеспечения.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин М.С., Балиоз Н.В., Айзман Р.И., Кривошеиков С.Г. Влияние аудиовизуальной стимуляции на психические и физиологические функции у спортсменов-легкоатлетов // Физиология человека. 2015. Т. 41. № 5. С. 90.
2. Головин М.С., Балиоз Н.В., Кривошеиков С.Г., Айзман Р.И. Интеграция функциональных, психофизиологических и биохимических процессов в организме спортсменов после аудиовизуальной стимуляции // Физиология человека. 2018. Т. 44. № 1. С. 64.
3. Глазачев О.С., Классина С.Я., Бобылева О.В., Класня А. Эффекты полимодальных ритмических сенсорных воздействий на состояние ЦНС и вегетативные функции человека // Физиология человека. 2010. Т. 36. № 2. С. 59.
4. Араби Л.С., Сысоев В.Н., Кремнева Т.В. Аудио-визуальная стимуляция в комплексной терапии психогенно обусловленных расстройств // Вестник психотерапии. 2011. № 39(44). С. 9.
5. Ашанина Е.Н., Кулаков Д.В. Эффективность парциального применения аудиовизуального воздействия и биологически обратной связи для коррекции дезадаптивных психических состояний специалистов экстремальных профессий // Вестник психотерапии. 2011. № 39(44). С. 85.
6. Tang H.Y., Vitiello M.V., Perlis M., Riegel B. Open-Loop Neurofeedback Audiovisual Stimulation: A Pilot Study of Its Potential for Sleep Induction in Older Adults // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. 2015. V. 40. № 3. P. 183.
7. Tang H.Y., Riegel B., McCurry S.M., Vitiello M.V. Open-Loop Audio-Visual Stimulation (AVS): A Useful Tool for Management of Insomnia? // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. 2016. V. 41. № 1. P. 39.
8. Sitaram R., Ros T., Stoeckel L. et al. Closed-loop brain training: the science of neurofeedback // Nat. Rev. Neurosci. 2017. V. 18. № 2. P. 86-100.
9. Tegeler C.H., Cook J.F., Tegeler C.L. et al. Clinical, hemispheric, and autonomic changes associated with use of closed-loop, allostatic neurotechnology by a case series of individuals with self-reported symptoms of post-traumatic stress // BMC Psychiatry. 2017. V. 17. № 1. P. 141.

10. *Levi T., Bonifazi P., Massobrio P., Chiappalone M.* Editorial: Closed-Loop Systems for Next-Generation Neuroprostheses // *Front. Neurosci.* 2018. V. 12. P. 26.
11. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Семёнов В.С.* Эффективность фотостимуляции, автоматически формируемой на основе ЭЭГ субъекта, снижается при отставлении обратной связи // *Физиология человека.* 2016. Т. 42. № 4. С. 38.
12. *Федотчев А.И., Журавлев Г.И., Ексина К.И. и др.* Оценка эффективности музыкального ЭЭГ нейроинтерфейса с дополнительным контуром управления от сердечного ритма // *Рос. физиол. журн.* 2018. Т. 104. № 1. С. 122.
13. *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. С. 62.
14. *Полевая С.А., Некрасова М.М., Рунова Е.В. и др.* Дискретный мониторинг и телеметрия сердечного ритма в процессе работы на компьютере для оценки и профилактики утомления и стресса // *Медицинский альманах.* 2013. № 2(26). С. 151.
15. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Бахчина А.В. и др.* Музыкально-акустические воздействия, управляемые биопотенциалами мозга, в коррекции неблагоприятных функциональных состояний // *Успехи физиологических наук.* 2016. Т. 47. № 1. С. 67.
16. *Rao A.R.* An oscillatory neural network model that demonstrates the benefits of multisensory learning // *Cogn. Neurodyn.* 2018. V. 12. № 5. P. 481.
17. *Maes P.J., Buhmann J., Leman M.* 3Mo: A Model for Music-Based Biofeedback // *Front. Neurosci.* 2016. V. 10. № 548. P. 1.
18. *Quadt L., Critchley H.D., Garfinkel S.N.* The neurobiology of interoception in health and disease // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2018. V. 1428. № 1. P. 112.
19. *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.
20. *Пирадов М.А., Черникова Л.А., Супонева Н.А.* Пластичность мозга и современные технологии нейрореабилитации // *Вестник РАН.* 2018. Т. 88. № 4. С. 299.

Effects of Audio-Visual Stimulation Automatically Controlled by Biopotentials of Human Brain and Heart

A. I. Fedotchev^{a,*}, S. B. Parin^b, S. A. Polevaya^c, A. A. Zemlianaia^d

^a*Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow region, Russia*

^b*Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia*

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

^d*Moscow Research Institute of Psychiatry – a branch of the FGBU “Serbsky” National Medical Research Center for Psychiatry and Narcology”, Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia*

*E-mail: fedotchev@mail.ru

We compared the effects of open-loop versus closed-loop audio-visual stimulation (AVS), the latter being online generated on the basis of subjects' bioelectrical activity. In the first experiment, volunteers were presented with closed-loop AVS consisted of photic and music-like stimuli generated by transformation of current parameters of subjects' electroencephalogram (EEG) and heart rhythm. In the second experiment, prearranged composition of photic and musical stimuli was used without feedback from the current bioelectric activity of the subjects. It was found that the most pronounced shifts in objective and subjective indicators, such as maximal increase in the EEG alpha rhythm power relative to the background, positive emotional reactions and shifts in the functional state of the body, are recorded in cases when the AVS is controlled by the current electrophysiological characteristics of the subjects. These effects result from the involvement of the mechanisms of interoception into a complex of mechanisms responsible for the normalization of human functional state under AVS, i.e. the mechanisms of multisensory integration, neuroplasticity and resonant mechanisms of the brain.

Keywords: audio-visual stimulation (AVS), closed-loop, open-loop, feedback, electroencephalogram (EEG), heart rhythm, interoception, correction of stress-induced states.