

МЕХАНИЗМЫ СВЕТОМУЗЫКАЛЬНОЙ СТИМУЛЯЦИИ, УПРАВЛЯЕМОЙ СОБСТВЕННЫМИ ИЛИ ЧУЖИМИ БИОПОТЕНЦИАЛАМИ МОЗГА И СЕРДЦА

DOI: 10.17691/stm2020.12.4.03

УДК 796.056:612.17:612.85:616–073.8

Поступила 23.02.2020 г.

© **А.И. Федотчев**, д.б.н., ведущий научный сотрудник лаборатории механизмов рецепции¹;
С.Б. Парин, д.б.н., профессор кафедры психофизиологии²;
Л.В. Савчук, аспирант²;
С.А. Полевая, д.б.н., зав. кафедрой психофизиологии²

¹Институт биофизики клетки РАН, ул. Институтская, 3, Пущино, Московская область, 142290;²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Н. Новгород, 603950

Цель исследования — сравнительный анализ эффектов, наблюдаемых при предъявлении испытуемым светомузыкальных воздействий, которые контролируются собственными биопотенциалами мозга и сердца (метод closed-loop) или биопотенциалами другого человека.

Материалы и методы. Добровольцы, находящиеся в состоянии стресса, попарно участвовали в двух экспериментах. В первом эксперименте светомузыкальные воздействия, предъявляемые каждому испытуемому из пары, формировались на основе собственных биопотенциалов мозга и сердца, а во втором — на основе биопотенциалов другого испытуемого.

Результаты. При обоих типах воздействий наблюдались эффекты уменьшения напряжения регуляторных систем организма, снижения уровня стресса и улучшения эмоционального состояния, обусловленные механизмами мультисенсорной интеграции и нейропластичности. Только при светомузыкальной стимуляции, управляемой собственными биопотенциалами мозга и сердца испытуемых, наблюдался статистически значимый рост мощности основных ритмов ЭЭГ, сопровождаемый значимыми позитивными сдвигами показателей психологического тестирования и положительно-эмоциональными реакциями на воздействия. Полученные данные объясняются интеграцией процессов восприятия и обработки значимых для человека интероцептивных сигналов в резонансные механизмы ЦНС, обеспечивающие нормализацию функционального состояния под влиянием воздействий.

Заключение. Полученные данные могут быть использованы для разработки эффективных методов персонализированных светомузыкальных воздействий, направленных на своевременное устранение функциональных нарушений и возвращение организма человека к оптимальному состоянию.

Ключевые слова: аудиовизуальная стимуляция; светомузыкальные воздействия; ЭЭГ; ритм сердцебиений; свои–чужие биопотенциалы; интероцептивные сигналы; коррекция стресс-индуцированных состояний.

Как цитировать: Fedotchev A.I., Parin S.B., Savchuk L.V., Polevaya S.A. Mechanisms of light and music stimulation controlled by a person's own brain and heart biopotentials or those of another person. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2020; 12(4): 23–29, <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.4.03>

English

Mechanisms of Light and Music Stimulation Controlled by a Person's Own Brain and Heart Biopotentials or Those of Another Person

A.I. Fedotchev, DSc, Leading Researcher, Laboratory of Reception Mechanisms¹;
S.B. Parin, DSc, Professor, Department of Psychophysiology²;
L.V. Savchuk, PhD Student²;
S.A. Polevaya, DSc, Head of the Department of Psychophysiology²

¹Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences, 3 Institutskaya St., Pushchino, Moscow Region, 142290, Russia;²National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Для контактов: Федотчев Александр Иванович, e-mail: fedotchev@mail.ru

The aim of the study was to carry out comparative analysis of effects observed in subjects exposed to light and music stimulation controlled by their own brain and heart biopotentials (closed-loop method) or biopotentials of another person.

Materials and Methods. Volunteers under stress participated in two experiments in pairs. In the first experiment, light and music stimulation effects formed in each subject in a pair on the basis of their own brain and heart biopotentials, while in the second experiment, they formed on the basis of biopotentials of the other subject.

Results. Both types of exposure caused reducing the tension of the regulatory systems in the body, reducing stress levels and improving the emotional state due to the mechanisms of multisensory integration and neuroplasticity. A significant increase in the power of the main EEG rhythms, accompanied by significant positive changes in psychological testing results and positive emotional responses to stimulation was observed only during light and music stimulation controlled by the subjects' own brain and heart biopotentials. These data are attributable to the integration of perception and processing of interoceptive signals significant for humans into the resonance mechanisms of the central nervous system, providing normalization of functional state due to stimulation.

Conclusion. The data obtained can be used for developing the effective methods of personalized light and music stimulation aimed at timely elimination of functional disorders and returning the human body to homeostasis.

Key words: audio-visual stimulation; exposure to light and music; EEG; heart rate; one's own–another person's biopotentials; interoceptive signals; correction of stress-induced states.

Введение

Метод аудиовизуальной стимуляции (АВС) в последнее время привлекает повышенное внимание благодаря ряду достоинств: мобильности, простоте реализации, скорости, многокомпонентности воздействия, способности улучшать функциональное состояние и здоровье человека [1–6]. Недавними исследованиями продемонстрированы возможности использования АВС для совершенствования режимов спортивных тренировок [7–9] и для уточнения дифференцированного диагноза при хронических расстройствах сознания [10]. В попытках выявить механизмы АВС оценена эффективность применения однократного сеанса такой стимуляции для коррекции функционального состояния организма [11], проведено изучение эффектов различных типов АВС [12], в том числе светомузыкальных воздействий, формируемых на основе собственных биоэлектрических процессов человека [13].

Ранее нами был проведен сравнительный анализ эффектов, наблюдаемых при подавлении стресс-индуцированных состояний светомузыкальными воздействиями с наличием и отсутствием управляющих сигналов обратной связи от биопотенциалов мозга и сердца испытуемых [14]. Было установлено, что наиболее выраженные сдвиги объективных и субъективных показателей, в том числе максимальный рост мощности альфа-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. Эти и ранее полученные нами данные [15] позволяют предположить, что выявленные эффекты объясняются вовлечением процессов восприятия и обработки значимых для человека interoceptивных сигналов в механизмы мультисенсорной интеграции, нейропластичности и резонансные механизмы мозга, обеспечи-

вающие нормализацию функционального состояния под влиянием АВС.

Экспериментальная проверка данного предположения может быть проведена в строго контролируемых исследованиях, где в качестве контроля будут выступать светомузыкальные воздействия, управляемые биопотенциалами другого человека. Исключая процессы восприятия и обработки собственных interoceptивных сигналов, такой контроль позволяет более детально анализировать механизмы осуществляемых воздействий.

Цель данной работы заключалась в выявлении механизмов АВС путем сравнительного анализа эффектов, наблюдаемых при предъявлении человеку светомузыкальных воздействий, контролируемых собственными биопотенциалами мозга и сердца (метод closed-loop) или биопотенциалами другого человека.

Материалы и методы

В исследовании приняли участие 30 испытуемых в возрасте от 18 до 23 лет, студентов Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, находившихся в состоянии стресса в период экзаменационной сессии.

Испытуемые-добровольцы попарно участвовали в двух экспериментах (обследованиях), которые проводились с интервалом в 1–2 дня. В первом эксперименте светомузыкальные воздействия, предъявляемые каждому испытуемому из пары, формировались на основе собственных биопотенциалов мозга и сердца, а во втором — на основе потенциалов другого испытуемого.

Работа проведена в соответствии с Хельсинкской декларацией (2013) и одобрена Этическим комитетом Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Каждый участник представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и пре-

имущества, а также характера предстоящего исследования.

В начале каждого эксперимента для оценки психофизиологического состояния испытуемых проводился их опрос и начальное тестирование с помощью двух ранее апробированных [16] тестов: 1) теста САН, в котором испытуемые дают оценку своего текущего самочувствия, активности и настроения; и 2) теста УЭД, позволяющего определять текущий уровень эмоциональной дезадаптации человека.

Испытуемые обследовались парами на двух параллельных экспериментальных установках. После начального тестирования им устанавливали ЭЭГ-датчики (активный электрод — в отведении Cz, референтный и заземляющий — на мочках ушей) и оригинальную систему регистрации электрокардиограммы с онлайн-анализом показателей variability сердечного ритма [17], а также стереонаушники Philips SBC HL140 (Нидерланды) и очки, в затемненные линзы которых были вмонтированы красные светодиоды с мощностью, не превышающей 100 мВт. Очки и стереонаушники обоих испытуемых подключались к одному из компьютеров. Студентов просили сидеть спокойно с закрытыми глазами в течение всех обследований.

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 записи с помощью оригинальной модификации динамического спектрального анализа, основанного на быстрых преобразованиях Фурье [18], определяли доминирующий у данного испытуемого узкополосный (0,4–0,6 Гц) спектральный компонент в диапазоне альфа-ритма (8–13 Гц) ЭЭГ.

Затем на установке, к которой были подключены очки и наушники обоих испытуемых, на 10 мин включали рабочий режим, во время которого им предъявляли светомузыкальные воздействия, формируемые на основе биопотенциалов мозга и сердца одного из них. При этом текущая амплитуда выявленного у данного испытуемого ЭЭГ-осциллятора преобразовывалась в музыкальные 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 музыкальные стимулы, генерируемые на основе сигнала ЭЭГ, дополнялись 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.

После стимуляции продолжали регистрацию ЭЭГ и кардиоинтервалов в течение 2 мин для измерения эффектов последствия, а также проводили повторное тестирование и опрашивали испытуемых об их субъективных ощущениях во время сеансов.

Второе обследование было аналогично первому, но испытуемые менялись местами на экспериментальных установках и светомузыкальные воздействия формировались на основе биопотенциалов мозга и сердца второго испытуемого из пары.

При обработке результатов анализировали показатели мощности тета-, альфа- и бета-ритмов ЭЭГ, показатели деятельности сердечно-сосудистой системы и результаты выполнения тестов САН и УЭД.

Для регистрации и анализа кардиоритма использовали технологию событийно-связанной телеметрии ритма сердца [19]. Последовательность R–R-интервалов ЭКГ передавалась на смартфон с миниатюрной сенсорной платформы Zephyr™ HxMTM Smart — Zephyr BIO PACH BH3-M1 (Zephyr Technology, США), закрепленной на грудной клетке испытуемых, по каналу Bluetooth. После обработки данные через каналы GSM транслировались в Интернет на специализированный сервер системы. Алгоритм обработки складывался из следующих этапов: фрагментация полученного R–R-сигнала с временным окном 100 с и временным сдвигом в 10 с; расчет частотного спектра методом дискретного преобразования Фурье для неравномерных сигналов для полученных окон; деление спектра на диапазоны (VLF — 0,003–0,040 Гц, LF — 0,04–0,15 Гц и HF — 0,15–0,4 Гц) и вычисление на последнем этапе таких производных характеристик, как общая мощность спектра variability ритма сердца (VPC) и симпатовагусный баланс (индекс вегетативного баланса) — LF/HF. Основное внимание при анализе VPC уделяли длительности R–R-интервалов, общей мощности спектра VPC как отражению адаптационного потенциала ЦНС и индексу вегетативного баланса как показателю напряжения регуляторных систем.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ SigmaPlot 11.0. Для оценки нормальности распределения использовали критерий Шапиро–Уилка. Поскольку все выборки удовлетворяли нормальному распределению в качестве основных характеристик, указывались среднее арифметическое (M) и стандартные ошибки (m). Оценку различий между выборками осуществляли с помощью парного t -критерия Стьюдента, позволяющего определять при воздействии сдвиги (со знаком) показателей относительно фона и оценивать уровни значимости этих сдвигов. Различия считались статистически значимыми при $p \leq 0,05$.

Результаты

Оценку ЭЭГ-эффектов проводили путем сопоставления динамик ритмов ЭЭГ до, во время и после

каждого типа воздействий (рис. 1). Была установлена разнонаправленная динамика выраженности ритмов ЭЭГ при двух видах стимуляции. Если при светомузыкальных воздействиях, контролируемых собственными биопотенциалами мозга и сердца испытуемых, происходил статистически значимый рост мощности всех ЭЭГ-ритмов, то использование чужих биопотенциалов либо не приводило к изменениям мощности тета- и бета-ритмов, либо, наоборот, статистически значимо снижало выраженность альфа-ритма ЭЭГ.

Аналогичным способом была проанализирована динамика показателей деятельности сердечно-сосудистой системы (рис. 2). На рисунке видно, что при

обоих типах воздействий наблюдается переход организма в низкоэнергетическое состояние со снижением показателей напряжения регуляторных систем: статистически значимо увеличивается длительность кардиоинтервалов, снижается индекс вегетативного баланса. Под влиянием воздействий, управляемых чужими биопотенциалами, происходит статистически значимое снижение общей мощности спектра ВРС, свидетельствуя о ригидизации ритма сердца и уменьшении адаптационного потенциала ЦНС.

Значительные различия наблюдаются также в субъективных реакциях испытуемых на предъявленные воздействия. Были определены сдвиги показателей

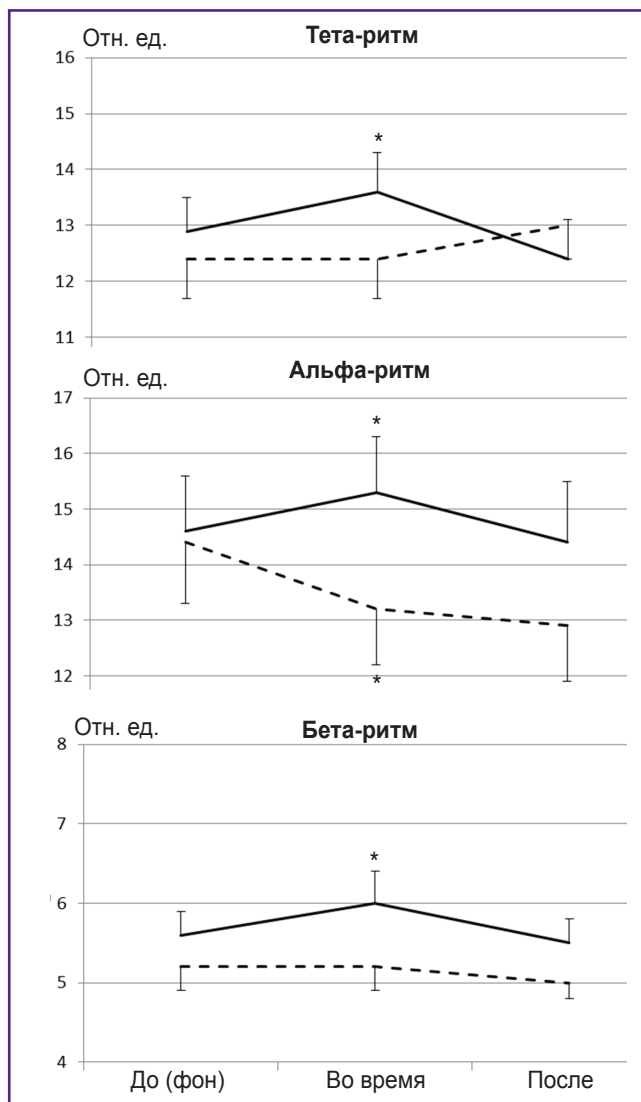


Рис. 1. Динамика мощности (отн. ед.) тета-, альфа- и бета-ритмов ЭЭГ в экспериментах с использованием светомузыкальных воздействий, управляемых собственными (сплошная линия) или чужими (пунктир) биопотенциалами. Звездочками отмечены статистически значимые ($p < 0,05$) различия показателей во время воздействия относительно фона

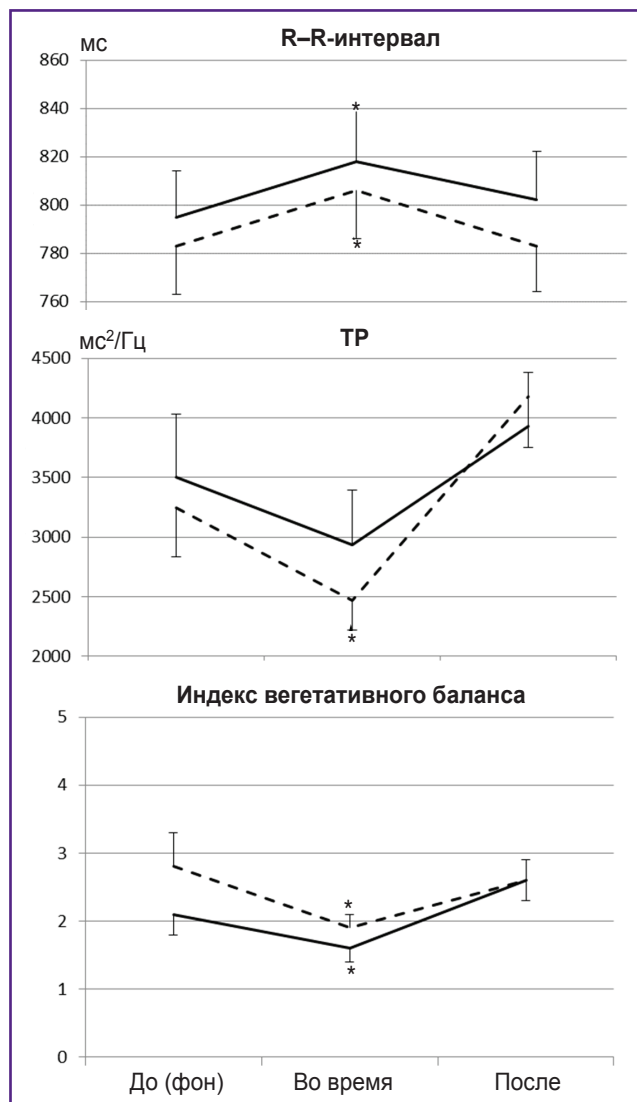


Рис. 2. Динамика R-R-интервалов, суммарной мощности спектра ВРС (TP) и индекса вегетативного баланса в экспериментах с использованием светомузыкальных воздействий, управляемых собственными (сплошная линия) или чужими (пунктир) биопотенциалами. Звездочками отмечены статистически значимые ($p < 0,05$) отличия показателей во время воздействия относительно фона

Сдвиги показателей в результате светомузыкальных воздействий, управляемых своими и чужими биопотенциалами, и уровень значимости этих сдвигов

| Показатель, баллы | Использованные биопотенциалы | | | |
|---------------------------------------|------------------------------|--------------|-------------|-------|
| | свои | | чужие | |
| | Сдвиг (M±m) | p | Сдвиг (M±m) | p |
| Тест САН — самочувствие | 0,20±0,09 | 0,032 | -0,01±0,16 | 0,922 |
| Тест САН — активность | -0,31±0,13 | 0,027 | -0,25±0,20 | 0,228 |
| Тест САН — настроение | 0,13±0,11 | 0,226 | 0,01±0,11 | 0,953 |
| Тест УЭД — эмоциональная дезадаптация | -0,29±0,14 | 0,044 | -0,12±0,15 | 0,275 |

Примечание: жирным шрифтом выделены статистически значимые сдвиги ($p < 0,05$).

тестов САН и УЭД под влиянием каждого типа воздействий относительно исходного уровня. Полученные данные представлены в таблице, из которой видно, что под влиянием светомузыкальной стимуляции, основанной на собственных биопотенциалах мозга и сердца, у испытуемых отмечаются статистически значимый рост оценок самочувствия, а также статистически значимое снижение оценок активности и уровня эмоциональной дезадаптации, свидетельствующие о релаксационном эффекте стимуляции. При использовании управляющих сигналов от чужих биопотенциалов значимых изменений тестируемых показателей не выявлено.

Опрос испытуемых о субъективных ощущениях в ходе экспериментов выявил их позитивное отношение к проведенным лечебным сеансам, снижение уровня стресса и улучшение эмоционального состояния. Особенно эмоционально были восприняты эксперименты с использованием управляющих сигналов от собственных биопотенциалов. Большинство испытуемых (23 из 30) оценили такие воздействия как приятные и успокаивающие.

Обсуждение

В предпринятом контролируемом исследовании, где каждый испытуемый являлся источником управляющих сигналов и для себя, и для другого человека, выявлены как общие черты, так и специфические особенности двух типов воздействий. Общими явились реакции сердца на стимуляцию, демонстрирующие снижение напряжения регуляторных систем организма, а также положительные субъективные реакции на проводимые сеансы, снижение уровня стресса и улучшение эмоционального состояния. В основе такой общности лежат, по всей вероятности, механизмы мультисенсорной интеграции [15, 20] и механизмы нейропластичности [21].

Основное различие между реакциями на два типа воздействий проявилось в статистически значимом росте мощности основных ритмов ЭЭГ при использовании собственных биопотенциалов испытуемого и в отсутствии таких эффектов при использовании

чужих биопотенциалов. Значимое увеличение выраженности всех ритмов ЭЭГ во время светомузыкальных воздействий, управляемых собственными биопотенциалами испытуемого, прямо указывает на участие резонансных механизмов деятельности мозга в отмеченных эффектах [22]. Согласно современным представлениям о механизмах АВС, совпадение ритмики стимуляции с частотами эндогенных колебательных нейродинамических процессов в ЦНС может приводить к резонансным явлениям и, следовательно, к синхронизации ранее нескоррелированных источников спонтанной ритмики головного мозга [23]. Именно такое совпадение обеспечивается при генерации ритмических светомузыкальных воздействий на основе текущих значений собственных биопотенциалов испытуемого. При использовании управляющих сигналов от чужих биопотенциалов такого совпадения не происходит и наблюдается даже подавление спонтанной ритмики мозга на частоте альфа-ритма ЭЭГ.

Проведенное исследование выявило и другие различия в реакциях на два типа воздействий. Светомузыкальная стимуляция, управляемая собственными биопотенциалами испытуемого, приводит к позитивным сдвигам показателей психологического тестирования и положительно-эмоциональным реакциям на воздействия. При использовании чужих биопотенциалов такие эффекты отсутствуют, а в деятельности сердца происходят перестройки, свидетельствующие о снижении адаптационного потенциала ЦНС.

При объяснении перечисленных различий необходимо иметь в виду, что биопотенциалы мозга и сердца являются источником interoцептивных сигналов, которые, по современным представлениям, играют важную роль в поддержании оптимального физического, эмоционального и психического здоровья человека [24]. Использование interoцептивных сигналов о состоянии собственного организма в процедурах биоуправления с обратной связью считается перспективным направлением современных исследований, требующим углубленного анализа [25]. Полученные нами данные о наличии целого ряда позитивных

эффектов при светомузыкальных воздействиях, управляемых собственными биопотенциалами испытуемых, и отсутствие таких эффектов при использовании чужих биопотенциалов дополняют и расширяют эти представления.

Заключение

Применение метода closed-loop [26], предполагающего использование собственных биоэлектрических процессов человека при организации лечебных воздействий, является одним из прогрессивных путей развития биомедицинских технологий [27]. Поэтому уточнение механизмов, обуславливающих эффекты применения собственных или чужих биопотенциалов в качестве фактора онлайн-модуляции светомузыкальной стимуляции, представляется актуальной задачей.

Предпринятое исследование подтвердило и уточнило ранее высказанное предположение [14] об участии механизмов мультисенсорной интеграции, нейропластичности и резонансных механизмов мозга в эффектах светомузыкальной стимуляции, автоматически генерируемой на основе собственных биопотенциалов мозга и сердца испытуемых. Главную роль в позитивных реакциях организма на примененные воздействия играет совместное участие процессов восприятия и обработки значимых для человека интерецептивных сигналов и резонансных механизмов деятельности мозга.

Полученные данные могут быть использованы для разработки эффективных методов персонализированных светомузыкальных воздействий, направленных на своевременное устранение функциональных нарушений и возвращение организма человека к оптимальному состоянию.

Благодарность. Авторы выражают благодарность Дарье Васильевне Бовыкиной, ассистенту кафедры психофизиологии Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, за помощь в проведении экспериментальных исследований.

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

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

Литература/References

1. Королев В.А., Савченко В.В. Аудиовизуальная стимуляция как метод улучшения функционального состояния и здоровья человека (литературный обзор). *Прикладные проблемы безопасности технических и биотехнических систем* 2018; 1: 35–40.

Korolev V.A., Savchenko V.V. Audio-visual stimulation as a method to improve the functional status and health (literature

review). *Prikladnye problemy bezopasnosti tehniceskikh i biotehniceskikh sistem* 2018; 1: 35–40.

2. Magosso E., Cuppini C., Bertini C. Audiovisual rehabilitation in hemianopia: a model-based theoretical investigation. *Front Comput Neurosci* 2017; 11: 113, <https://doi.org/10.3389/fncom.2017.00113>.

3. Ostrolenk A., Bao V.A., Mottron L., Collignon O., Bertone A. Reduced multisensory facilitation in adolescents and adults on the autism spectrum. *Sci Rep* 2019; 9(1): 11965, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48413-9>.

4. Pan F., Zhang L., Ou Y., Zhang X. The audiovisual integration effect on music emotion: behavioral and physiological evidence. *PLoS One* 2019; 14(5): e0217040, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217040>.

5. Grasso P.A., Benassi M., Lдавас E., Bertini C. Audiovisual multisensory training enhances visual processing of motion stimuli in healthy participants: an electrophysiological study. *Eur J Neurosci* 2016; 44(10): 2748–2758, <https://doi.org/10.1111/ejn.13221>.

6. Fedotchev A.I., Dvorianinova V.V., Velikova S.D., Zemlyanaya A.A. Modern technologies in studying the mechanisms, diagnostics, and treatment of autism spectrum disorders (review). *Sovremennye tehnologii v medicine* 2019; 11(1): 31–39, <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.03>.

7. Golovin M.S., Aizman R.I., Balioz N.V., Krivoshchekov S.G. Effect of audiovisual stimulation on the psychophysiological functions in track-and-field athletes. *Human Physiology* 2015; 41(5): 532–538, <https://doi.org/10.1134/s0362119715050047>.

8. Barreto-Silva V., Bigliassi M., Chierotti P., Altimari L.R. Psychophysiological effects of audiovisual stimuli during cycle exercise. *Eur J Sport Sci* 2018; 18(4): 560–568, <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1514139>.

9. Bigliassi M., Greca J.P.A., Barreto-Silva V., Chierotti P., de Oliveira A.R., Altimari L.R. Effects of audiovisual stimuli on psychological and psychophysiological responses during exercise in adults with obesity. *J Sports Sci* 2019; 37(5): 525–536, <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1514139>.

10. Naro A., Leo A., Bruno R., Cannavò A., Buda A., Manuli A., Bramanti A., Bramanti P., Calabrò R.S. Reducing the rate of misdiagnosis in patients with chronic disorders of consciousness: is there a place for audiovisual stimulation? *Restor Neurol Neurosci* 2017; 35(5): 511–526, <https://doi.org/10.3233/RNN-170741>.

11. Сысоев В.Н., Чебыкина А.В., Душкина М.А., Дерачев В.Б. Оценка эффективности использования однократного сеанса аудиовизуальной стимуляции для коррекции функционального состояния организма. *Вестник Российской военно-медицинской академии* 2018; 3(63): 128–132.

Sysoev V.N., Chebykina A.V., Dushkina M.A., Dergachev V.B. Evaluation of the effectiveness of single session audiovisual stimulation for the organism functional state's correction. *Vestnik Rossijskoj voenno-meditsinskoj akademii* 2018; 3(63): 128–132.

12. Дудельзон В.А., Кальманов А.С., Булавин В.В. Применение различных режимов аудиовизуальной стимуляции для оптимизации функционального состояния военнослужащих. *Военно-медицинский журнал* 2018; 339(5): 47–51.

Dudelzon V.A., Kalmanov A.S., Bulavin V.V. Application of various modes of audiovisual stimulation to optimize the functional state of military personnel. *Voенно-meditsinskij zhurnal* 2018; 339(5): 47–51.

13. Федотчев А.И., Парин С.Б., Полевая С.А. Нейроинтерфейсы, управляемые биопотенциалами мозга и сердца, в коррекции стресс-вызванных расстройств. *Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. Гуманитарные и общественные науки* 2019; 1: 144–152, <https://doi.org/10.22204/2587-8956-2019-094-01-144-152>.

Fedotchev A.I., Parin S.B., Poleyaya S.A. Use of cardiac and cerebral biopotential-operated neurointerfaces in management of stress-induced disorders. *Vestnik Rossijskogo fonda fundamental'nyh issledovanij. Gumanitarnye i obschestvennye nauki* 2019; 1: 144–152, <https://doi.org/10.22204/2587-8956-2019-094-01-144-152>.

14. Fedotchev A.I., Parin S.B., Poleyaya S.A., Zemlianaia A.A. Effects of audio-visual stimulation automatically controlled by the bioelectric potentials from human brain and heart. *Human Physiology* 2019; 45(5): 523–526, <https://doi.org/10.1134/s0362119719050025>.

15. Полевая С.А. Интегративные принципы кодирования и распознавания сенсорной информации. Особенности осознания световых и звуковых сигналов в стрессовой ситуации. *Вестник Новосибирского государственного университета* 2008; 2(2): 106–117.

Poleyaya S.A. Integrative principles of coding and recognition of sensory information. Features of conscious perception of image and sound under stress condition. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta* 2008; 2(2): 106–117.

16. 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: 62–67.

Kataev A.A., Bakhchina A.V., Poleyaya 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 psihofiziologii* 2017; 2: 62–67.

17. 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. Дискретный мониторинг и телеметрия сердечного ритма в процессе работы на компьютере для оценки и профилактики утомления и стресса. *Медицинский альманах* 2013; 2(26): 151–155.

Poleyaya S.A., Nekrasova M.M., Runova E.V., Bakhchina A.V., Gorbunova N.A., Bryantseva N.V., Kozhevnikov V.V., Shishalov I.S., Parin S.B. Discrete monitoring and telemetry of heart rate in the process of working on a computer to assess and prevent fatigue and stress. *Medicinskij al'manah* 2013; 2(26): 151–155.

18. 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., Poleyaya S.A., Radchenko G.S. Music-acoustic signals controlled by subject's brain potentials in the correction of

unfavorable functional states. *Uspehi fiziologicheskikh nauk* 2016; 47(1): 69–79.

19. Poleyaya S.A., Eremin E.V., Bulanov N.A., Bakhchina A.V., Kovalchuk A.V., Parin S.B. Event-related telemetry of heart rhythm for personalized remote monitoring of cognitive functions and stress under conditions of everyday activity. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2019; 11(1): 109–115, <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.13>.

20. Golovin M.S., Aizman R.I., Balioz N.V., Krivoschekov S.G. Integration of functional, psychophysiological, and biochemical processes in athletes after audiovisual stimulation. *Human Physiology* 2018; 44(1): 54–59, <https://doi.org/10.1134/s0362119718010073>.

21. Пирадов М.А., Черникова Л.А., Супонева Н.А. Пластичность мозга и современные технологии нейрореабилитации. *Вестник Российской академии наук* 2018; 88(4): 299–317, <https://doi.org/10.7868/S0869587318040023>.

Piradov M.A., Chernikova L.A., Suponeva N.A. Brain plasticity and modern neurorehabilitation technologies. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk* 2018; 88(4): 299–317, <https://doi.org/10.7868/S0869587318040023>.

22. Федотчев А.И. Анализ резонансных ЭЭГ-реакций при оценке эффективности сенсорных воздействий. *Физиология человека* 1997; 23(4): 117–132.

Fedotchev A.I. Analysis of resonant EEG reactions in assessing the effectiveness of sensory effects. *Fiziologiya cheloveka* 1997; 23(4): 117–132.

23. Ашанина Е.Н., Сенник М.Н. Современные исследования техник аудиовизуального воздействия (обзор отечественной и иностранной литературы за 2011–2018 гг.). *Вестник психотерапии* 2018; 67(72): 44–65.

Ashanina E.N., Senik M.N. Modern researches of techniques of audio-visual entertainment (review of domestic and foreign literature for 2011–2018). *Vestnik psihoterapii* 2018; 67(72): 44–65.

24. Quadt L., Critchley H.D., Garfinkel S.N. The neurobiology of interoception in health and disease. *Ann N Y Acad Sci* 2018; 1428(1): 112–128, <https://doi.org/10.1111/nyas.13915>.

25. Khalsa S.S., Adolphs R., Cameron O.G., Critchley H.D., Davenport P.W., Feinstein J.S., Feusner J.D., Garfinkel S.N., Lane R.D., Mehling W.E., Meuret A.E., Nemeroff C.B., Oppenheimer S., Petzschner F.H., Pollatos O., Rhudy J.L., Schramm L.P., Simmons W.K., Stein M.B., Stephan K.E., Van den Bergh O., Van Diest I., von Leupoldt A., Paulus M.P.; Interoception Summit 2016 participants. Interoception and mental health: a roadmap. *Biol Psychiatry Cogn Neurosci Neuroimaging* 2018; 3(6): 501–513, <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2017.12.004>.

26. Sitarum R., Ros T., Stoeckel L., Haller S., Scharnowski F., Lewis-Peacock J., Weiskopf N., Blears M.L., Rana M., Oblak E., Birbaumer N., Sulzer J. Closed-loop brain training: the science of neurofeedback. *Nat Rev Neurosci* 2017; 18(2): 86–100, <https://doi.org/10.1038/nrn.2016.164>.

27. Ganzer P.D., Sharma G. Opportunities and challenges for developing closed-loop bioelectronic medicines. *Neural Regen Res* 2019; 14(1): 46–50, <https://doi.org/10.4103/1673-5374.243697>.