

УДК 612.82:57

## МЕХАНИЗМЫ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДИК САМОУПРАВЛЕНИЯ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Долецкий А.Н., Хвастунова И.В., Ахундова Р.Е., Мигулина А.А.

ГБОУ ВПО «Волгоградский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения России, Волгоград, e-mail: andoletsky@volgmed.ru

Проводился анализ изменений биоэлектрической активности головного мозга и сверхмедленной активности в нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой системах в процессе адаптивного биоуправления с биологической обратной связью по параметрам церебральной гемодинамики и медитации. Осуществлялась регистрация сверхмедленной активности нервной и сердечно-сосудистой систем и локализация биоэлектрической активности нервной системы. Выявлено вовлечение различных мозговых структур в реализацию поведенческих стратегий в группах обучившихся различным видам самоуправления, что говорит о различии механизмов достижения конечного результата. Полученные результаты свидетельствуют о вовлечении кардиореспираторной синхронизации в изменение биоэлектрической активности только при релаксации с помощью адаптивного биоуправления. Осуществлена проверка резонансной гипотезы релаксации, согласно которой при совпадении частот изменения дыхания, биоэлектрической активности мозга, сердечного ритма и сосудистого тонуса происходит усиление активности в вовлекаемых в резонансный ответ структурах.

**Ключевые слова:** адаптивное биоуправление, физиологический резонанс, сверхмедленная активность

## IMPLEMENTATION MECHANISMS OF BIOFEEDBACK TECHNIQUES

Doletskiy A.N., Akhundova R.E., Khvastunova I.V., Migulina A.A.

Volgograd State Medical University, Volgograd, e-mail: andoletsky@volgmed.ru

Brain activity and infraslow activity in the nervous, respiratory and circulatory systems during biofeedback by cerebral hemodynamic parameters and meditation. Registration of infraslow nervous and cardiovascular activity, localization of the bioelectrical cerebral activity was performed. Infraslow activity was analyzed in range between 0,07 and 1 Hz after Fast Fourier Transform. Each EEG record was filtrated in the alpha 1–3, beta and theta bands. Inverse EEG problem was solved by using the search for sources of brain activity localization in filtering ranges (BrainLoc v.6.0 was used). Revealed the involvement of different brain structures in the implementation of behavioral strategies in different types of groups trained to self-government, suggesting different mechanisms to achieve the final result. The results suggest, that mechanism of biofeedback including synchronization of breathing rate, brain activity, heart rate and vascular tone frequencies. It's lead to increasing activity in the involved resonant response structures (thalamic pacemaker structures, vasomotor nuclei and respiratory centers).

**Keywords:** adaptive biofeedback, physiological resonance, infraslow oscillations

Одним из наиболее перспективных немедикаментозных способов психической саморегуляции и релаксации, не связанным с фармакологическим воздействием, является метод обучения самоуправлению и способности к релаксации с помощью биологической обратной связи (БОС). Согласно представлениям некоторых исследователей, методики биоуправления основаны на эффекте суммации предощущения (субсенсорного ощущения) с изоморфным раздражителю сигналом биологической обратной связи. Возникает феномен прироста интенсивности ощущения [1]. Данные эффекты определяются повышенной чувствительностью центральной нервной системы к воздействиям физических факторов колебательно-волновой природы, резонансными механизмами взаимодействия прерывистых раздражений с эндогенными ритмическими процессами организма [6]. Вместе с тем, в литературе встречаются предположения как о наличии особых механизмов реализации управления различными физиологическими параметрами в процессе психофизиологической релаксации с помощью

БОС тренингов, медитации и аутотренинга, так и о неспецифичности действия методов психической саморегуляции [9, 10]. Вероятной причиной разногласий может считаться различие используемых подходов к оценке эффективности методик и регистрируемых показателей [2].

Ряд исследований свидетельствуют о существенном вкладе в регуляцию деятельности организма сверхмедленных физиологических процессов. Установлено их значение как интегральных показателей функционального состояния центральной нервной системы и висцеральных органов [7, 8]. Однако работ, проверяющих наличие взаимосвязей между межсистемными колебательными процессами и эффективностью методов саморегуляции, в литературе найдено не было.

Целью исследования явился анализ изменений биоэлектрической активности головного мозга и сверхмедленной активности (СМА) в нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой системах в процессе адаптивного биоуправления с БОС и медитации, с целью проверки гипотезы о нали-

ции нескольких механизмов немедикаментозной релаксации.

### Материалы и методы исследования

В двух сопоставимых по половозрастной структуре группах молодых (18–25 лет) здоровых лиц проводились БОС-тренинги и занятия релаксационной медитацией с применением функциональной музыки. Группы по 30 испытуемых формировались с помощью рандомизации методом последовательных номеров из двух категорий студенческой молодежи – не имевших опыта релаксационной медитации и занимавшихся данным способом саморегуляции на протяжении последнего года. БОС-тренинги, направленные на снижение тонуса церебральных сосудов по реоэнцефалографическим показателям (РЭГ-БОС) проводились с испытуемыми из первой группы в среднем 2 раза в неделю, длительность каждого тренинга – 4 недели. Для оценки мозговой гемодинамики в режиме реального времени использовался ранее предложенный нами параметр гармонического анализа реоэнцефалограммы – показатель тонуса артерий крупного калибра (Кр\_арт) [3]. Согласно результатам наших предыдущих исследований, подобной продолжительности тренинга достаточно для формирования навыка релаксации большинства испытуемых. Каждый сеанс включал по 5–10 (в среднем – 8) трёхминутных сессий с отдыхом в течение 1 минуты после сессии. Перед испытуемым ставилась задача снижения тонуса церебральных сосудов посредством максимального уменьшения предъявляемого графически ИПК. С помощью компьютерного 21-канального полиграфа «Энцефалан» (ООО «Медиком-МТД», Таганрог) проводилась регистрация ЭКГ, РЭГ и ЭЭГ до и после последнего сеанса БОС (в первой группе), до и после однократного сеанса релаксационной медитации (во второй группе). Для анализа биоэлектрической активности мозга использовались свободные от артефактов 20-секундные участки ЭЭГ, записанной. С помощью методов поиска источников биоэлектрической активности BrainLoc (© ООО «Нейрософт», 2004–2012) выполнялся анализ влияния разных видов релаксации на характер и локализацию биоэлектрической активности головного мозга. Каждая электроэнцефалографическая запись подвергалась узкополосной фильтрации в альфа-, бета- и тета-диапазонах, в последующем с помощью методов решения обратной задачи ЭЭГ анализировались не менее 3 участков, выбирались наиболее стабильные данные локализации источников биоэлектрической активности). Для анализа синхронизации сверхмедленной активности (СМА) в нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой системах безартефактные фрагменты ЭЭГ, ЭКГ и РЭГ записей продолжительностью одна минута транспонировались в формат программы «MatLab», где с помощью модуля EEGLAB проводилось преобразование Фурье, выполнялась оценка встречаемости частот в диапазоне от 0,07 до 1 Гц.

### Результаты исследования и их обсуждение

При управлении показателем Кр\_арт после обучения адаптивному биоуправлению с БОС снижение регулируемого показателя составляло в среднем  $45,5 \pm 20,68\%$

от предтренингового значения, а длительность успешной регуляции –  $42,2 \pm 20,6\%$ , что соответствует выраженному уменьшению тонуса церебральных артерий крупного калибра. Среднее значение Кр\_арт до сеанса БОС составило 142 усл. ед., нижний и верхний квартиль – 122 и 162 усл. ед. соответственно. После сеанса БОС медиана, нижний и верхний квартиль равнялись 130, 109 и 147 усл. ед. соответственно.

### Частота использования различных стратегий релаксации при обучении управлению с БОС

Индивидуальная стратегия релаксации	Частота использования (%)
4–6 ДД в минуту	23,7
6–12 ДД в минуту	29,0
12–16 ДД в минуту	13,3
Счет в уме	2,7
Прослушивание музыки	11,7
Медитация	11,3
Не знаю	8,3

Наиболее эффективными в управлении всеми регулируемыми параметрами оказались стратегии релаксации — дыхание с частотой 6–12 и 4–6 дыхательных движений (ДД) в минуту.

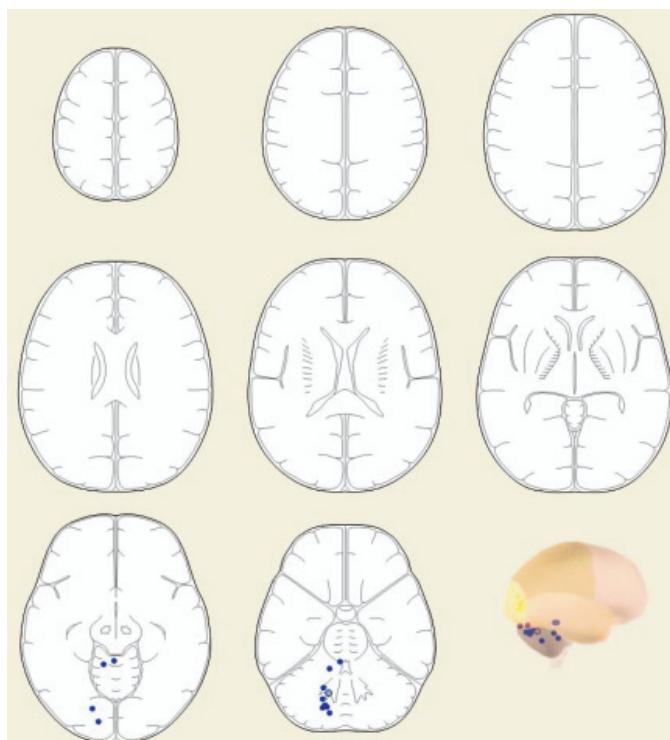
В группе занимавшихся медитацией до сеанса медиана, нижний и верхний квартиль равнялись 126, 103 и 147 усл. ед., после сеанса – 138, 123, 184 усл. ед. соответственно. Таким образом, при проведении БОС изменение целевого показателя эффективно и благоприятно, тогда как при медитации отмечалась обратная реакция – повышение сосудистого сопротивления.

В процессе БОС-тренинга по показателям церебральной гемодинамики происходит снижение генерализации биоэлектрической активности, формирование более выраженного фокуса альфа-ритма в затылочных областях коры, наиболее выраженное в альфа-3 диапазоне. Причем локализация превалирующих генераторов биоэлектрической активности в затылочных областях была характерна даже для лиц с десинхронным типом ЭЭГ, не имевших четко выраженной альфа-активности при визуальном анализе ЭЭГ.

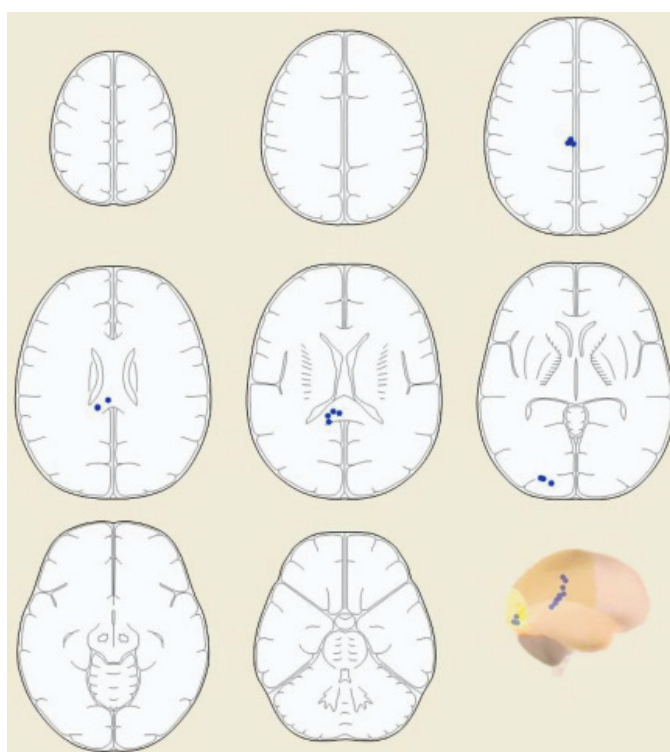
Вместе с тем, при локализации источников доминирующей альфа-активности с помощью узкополосных спектров отмечается следующая особенность: при использовании произвольного контроля дыхания

в качестве стратегии эффективного самоуправления с БОС большинство единичных диполей, характеризующих моментальные

источники биоэлектрической активности, локализовались в срединных отделах мозга (рис. 1).



а



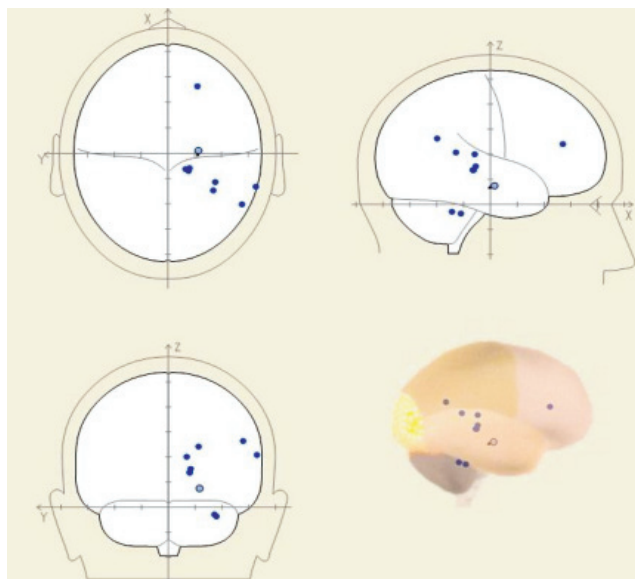
б

Рис. 1. Локализация источников активности частоты 11–13 Гц в процессе БОС-тренинга по выраженности тонуса церебральных артерий с ведущей стратегией релаксации – «дыхание с частотой 6 в минуту» у испытуемых Л., ведущая стратегия релаксации – и Ш., (Б). Модель: один подвижный диполь. Коэффициент дипольности 0,99

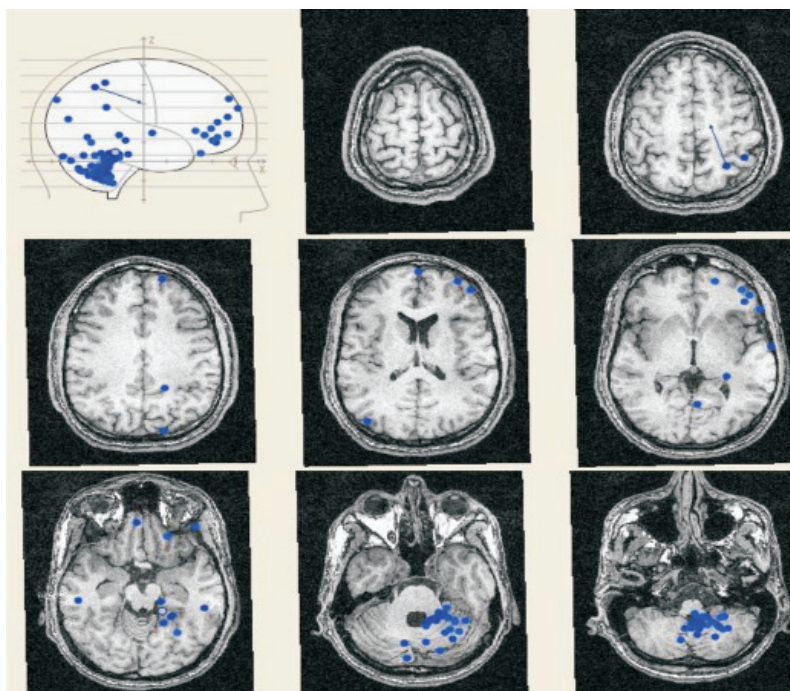
Это подтверждает имеющиеся данные о роли неспецифических структур ствола мозга и ассоциативных таламо-кортикальных систем в совместном обеспечении процессов подкорково-корковой интеграции и характеризует ствольные образования как наиболее постоянный нейро-

физиологический субстрат адаптивного биоуправления с БОС.

В то же время для лиц, занимавшихся медитацией, была характерна диффузная активность с выраженной асимметрией распределения биопотенциалов до и после сеанса.



а



б

Рис. 2. Локализация источников активности частоты 11-13Гц у испытуемой Т. в состоянии спокойного бодрствования (А) и медитационной релаксации (Б). Модель: один подвижный диполь. Коэффициент дипольности 0,99

Приведенные результаты анализа данных ЭЭГ-исследований в группах обучившихся различным видам самоуправления

свидетельствуют о вовлечении различных мозговых структур в реализацию поведенческих стратегий, что говорит о различии

механизмов достижения конечного результата. Возможно, данные различия связаны с направленностью БОС-тренинга на изменение только одного показателя, в то время как релаксационная медитация имеет более общую, неспецифическую направленность. Выявленная связь успешности адаптивного биоуправления с БОС и использования дыхательной релаксации послужила основанием для регистрации СМА нервной и сердечно-сосудистой систем в дополнительной группе испытуемых, при обследовании дышавших в навязанном ритме 6 и 12 раз в минуту (0,1 и 0,2 Гц, соответственно). Данная группа была сопоставима по половозрастному соотношению с исследуемыми группами.

Исследование динамики СМА нервной и сердечно-сосудистой систем при медитативной релаксации выявило неспецифический характер изменений, выражающихся в усилении СМА более чем в 1,5 раза по сравнению с покоем на частотах 0,31, 0,44, 0,62 и 0,87 Гц при значительном сниже-

нии представленности частот кардиореспираторной синхронизации (0,13–0,2 Гц) и частоты 0,5 Гц. Вместе с тем, при БОС-тренинге отмечалось увеличение СМА во всем диапазоне исследованных частот. При этом отмечались как совпадающие для медитации, БОС-тренинга (на частотах 0,31, 0,44, 0,56, 0,62 и 0,87 Гц), так и разнонаправленные сдвиги, наиболее выраженные на частотах 0,13, 0,19 и 0,94 Гц. Характерно, что отмечавшееся в процессе БОС-тренинга увеличение СМА в диапазоне 0,13–0,19 Гц было сонаправлено изменениям, возникавшим при ритмическом навязанном дыхании (рис. 3). Показательным является резонансное увеличение биоэлектрической активности на частотах 0,13 и 0,19 Гц при дыхании в навязанном ритме 6 и 12 раз в минуту (0,1 и 0,2 Гц, соответственно). Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о вовлечении кардиореспираторной синхронизации в изменение биоэлектрической активности только при релаксации с помощью адаптивного биоуправления.

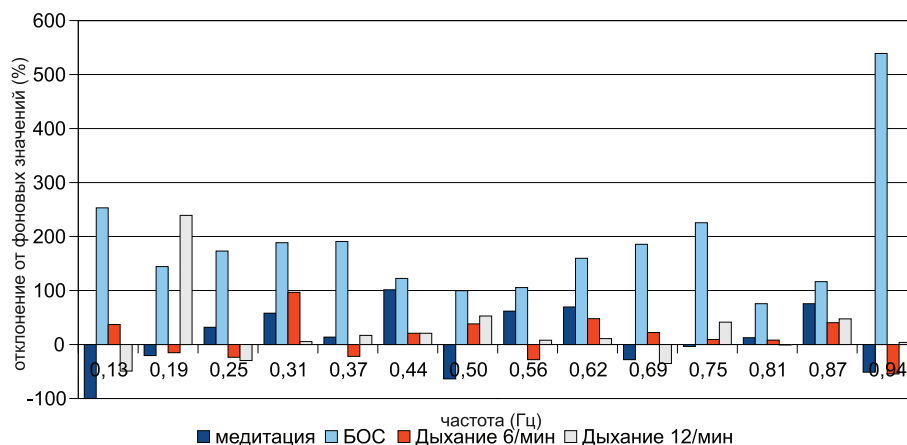


Рис. 3. Динамика сверхмедленной биоэлектрической активности головного мозга при различных видах релаксации

Частоты 0,31, 0,44, 0,62 и 0,87 Гц встречались как при регистрации активности нервной, так и сердечной и сосудистой систем. Вместе с тем, отмечались частоты синхронизации, характерные только для мозговой гемодинамики – 0,37 и 0,69 Гц. Колебания 0,37–0,94 Гц по длительности занимают промежуточное между пульсовыми и дыхательными волнами положение, что позволяет исключить гемодинамический или дыхательный характер данных колебаний.

Известно, что выраженность СМА отражает состояние стресс-реализующих систем и механизмов компенсации метаболиче-

ских сдвигов, в том числе кислотно-основного, газового и электролитного гомеостаза на органном и организменном уровнях [4]. Это находит подтверждение и в литературных данных о роли в формировании сверхмедленной электрической активности головного мозга супраоптической области гипоталамуса, перивентрикулярных ядер, дорсомедиального ядра таламуса и гиппокампа [7]. Их вовлечение в реализацию обучения адаптивному биоуправлению с БОС в настоящем исследовании подтверждается как регистрацией сверхмедленной активности нервной и сердечно-сосудистой систем, так и локализацией биоэлектрической

активности нервной системы. Выявленная связь успешности БОС с ритмическим дыханием свидетельствует о роли резонансных процессов в механизме адаптивного биоуправления с БОС. Это позволило выдвинуть резонансную гипотезу релаксации, согласно которой при совпадении частот изменения дыхания, биоэлектрической активности мозга, сердечного ритма и сосудистого тонуса происходит усиление активности в вовлекаемых в резонансный ответ структурах (таламических пейсмейкерных структурах, ядрах сосудодвигательного и дыхательного центра).

Резонансный характер изменений показателей биоэлектрической активности мозга, выраженности вегетативных влияний на сердечный ритм и тонуса церебральных сосудов может быть обусловлен следующими механизмами: изменением уровня мембранной возбудимости нейронных систем за счет усиления афферентных потоков; направленной активацией стресслимитирующих систем с закреплением позитивных эффектов за счет нормализации системного гомеостаза; активацией неспецифических активирующих систем головного мозга, приводящей к активации существующего, но неэффективно функционирующего симпатического аппарата нейронов [5].

### Выводы

1. Эффективность управления целевым показателем с помощью БОС выше, чем при использовании медитации, при этом анализ локализации источников биоэлектрической активности позволяет сделать вывод о вовлечении различных участков нервной системы при использовании различных методов саморегуляции.

2. Результаты сравнительного анализа эффективности снижения сосудистого со-

противления позволяют рекомендовать обучение БОС как более эффективный метод.

3. Нейрофизиологическим механизмом, обеспечивающим эффективное адаптивное биоуправление, является активация неспецифических структур ствола мозга и ассоциативных таламо-кортикальных связей по резонансному принципу.

### Список литературы

1. Боксер О.Я. Особенности проявления основного психофизического закона при работе человека при работе человека в режиме биологической обратной связи // Физиология человека. – 1994. – Т. 20, № 2. – С. 5–16.
2. Богданов О.В., Пинчук Д.Ю., Михайленок Е.Л. Эффективность различных форм сигналов обратной связи в ходе лечебных сеансов функционального биоуправления // Физиология человека. – 1990. – Т. 16, № 1. – С. 13–17.
3. Долецкий А.Н. Использование нейрофизиологических критериев для прогноза успешности управления тонусом мозговых сосудов с помощью биологической обратной связи // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. – 2005. – Т. 14, № 2. – С. 8–11.
4. Илюхина В.А. Мозг человека в механизмах информационно-управляющих взаимодействий организма и среды обитания. – СПб., 2004. – 328 с.
5. Кузьмин А.А., Пронин Т.В., Филист С.А. Исследование и коррекция состояния вегетативной нервной системы способом функционального резонанса сердечно-сосудистой системы // Вестник новых медицинских технологий. – 2006. – Т. XIII, № 2. – С. 85–87.
6. Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Акоев И.Г. Ритмическая структура ЭЭГ человека: современное состояние и тенденции исследований // Успехи физиол. наук. – 2000. – Т. 31, № 3. – С. 39–53.
7. Филиппов И.В., Кребс А.А., Пугачев К.С. Сверхмедленные механизмы переработки сенсорной информации в высших таламо-кортикальных представительствах головного мозга // Физиология адаптации: материалы 2-й Всероссийской научно-практической конференции (Волгоград, 22–24 июня 2010). – 2010. – С. 120–123.
8. Фокин Н.В., Пономарева В.Ф. Энергетическая физиология мозга. – М.: Антидор, 2003. – 288 с.
9. Critchley H.D., Melmed R.N., Featherstone E., и др. Brain activity during biofeedback relaxation: a functional neuroimaging investigation // Brain. – 2001. – Vol. 124. – № 5. – P. 1003–1012.
10. Wheat A.L., Larkin K.T. Biofeedback of heart rate variability and related physiology: A critical review // Applied Psychophysiology and Biofeedback. – 2010. – Vol. – 35. – № 3. – P. 229–242.