

Обзор литературы

УДК 815.8

EDN: <https://elibrary.ru/MJNNWQ>

Биологическая обратная связь в нейрореабилитации (современный обзор)

Елизавета Михайловна Тарасова^{1✉}, Тимур Сергеевич Петренко¹,
Василий Ильич Борисов²

¹ Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

✉ tarasovaeliza008@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен обзор современных инструментов нейрореабилитации, основанных на методе биологической обратной связи (БОС). В качестве канала обратной связи используются одиночные биологические сигналы: электроэнцефалограмма (ЭЭГ), электрокардиограмма (ЭКГ), электрическая активность кожи (ЭДА), виброакустические сигналы (пневмотахиметрия, пульсометрия, электромиограмма (ЭМГ)). Каждая модификация биоконтроля имеет свои особенности и используется в реабилитации в связи с ними. В настоящее время наиболее распространенным каналом с доказательной базой является ЭЭГ. Однако даже он не дает тех результатов, которые говорили бы о безоговорочном успехе применения БОС. В связи с этим мы представили новую концепцию БОС, которая обсуждается в научном сообществе в последние годы, — мультимодальную биологическую обратную связь. Слияние информации предполагает интеграцию динамического и переменного потока информации из мультимодальных источников для определения состояния контролируемой системы, давая клиницисту полную картину. Мы считаем, что технология биологической обратной связи готова к быстрому развитию и внедрению в реабилитационной медицине в ближайшем будущем.

Ключевые слова: биологическая обратная связь, сигнал, мультимодальный сигнал, реабилитация, медицина

Для цитирования: Тарасова Е. М., Петренко Т. С., Борисов В. И. Биологическая обратная связь в нейрореабилитации (современный обзор) // Вестник УГМУ. 2024. № 1. С. 27–39. EDN: <https://elibrary.ru/MJNNWQ>.

Biofeedback in Neurorehabilitation (Modern Review)

Elizaveta M. Tarasova^{1✉}, Timur S. Petrenko¹, Vasily I. Borisov²

¹ Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russia

² Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

✉ tarasovaeliza008@yandex.ru

Abstract. This article provides an overview of modern neurorehabilitation techniques based on biofeedback technology. We analyzed 67 published articles on biofeedback and found that single biological signals are often used as feedback channels, including electroencephalogram (EEG), electrocardiogram (ECG), electrical skin activity (EDA), and vibroacoustic signals such as pneumotachimetry and heart rate monitoring. EMG is also used. Each modification of biofeedback has its own unique characteristics and is utilized in rehabilitation based on these characteristics. Currently, the most commonly used evidence-based biofeedback channel is EEG. However, even this channel does not guarantee unconditional success when used in conjunction with BOS (biofeedback). This is why we propose a new concept for biofeedback that has been discussed recently in the scientific literature — multimodal biofeedback (MBF). MBF integrates multiple biofeedback signals to provide more accurate and comprehensive feedback to patients. This approach may help to improve the effectiveness of neurorehabilitation and achieve better outcomes for patients. Information fusion involves integrating a dynamic and varying flow of information from multiple sources in order to determine the status of a controlled system, providing the clinician with a comprehensive picture. We believe that biofeedback technology is well-suited for rapid development and application in rehabilitation medicine in the near future.

Keywords: biofeedback, signal, multimodal signal, rehabilitation, medicine

For citation: Tarasova EM, Petrenko TS, Borisov VI. Biofeedback in neurorehabilitation (Modern review). *Bulletin of USMU*. 2024;(1):27–39. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/MJNNWQ>.

Введение. Биологическая обратная связь (БОС) используется более 50 лет в реабилитации людей для восстановления нормальных моделей движения после травм [1]. Принцип БОС основывается на взаимодействии человека с прибором со множеством различных датчиков, который информирует о состоянии его функциональных систем в режиме реального времени. В основе этого метода регулирования и определения психофизиологического состояния человека лежит индивидуальный подход к пациенту. Именно построение индивидуального оптимального плана воздействия на психофизиоло-

гическое состояние и своевременная коррекция тактики необходимы для достижения быстрого результата [2–4].

Создание метода произошло благодаря фундаментальным исследованиям механизмов регуляции физиологических и развития патологических процессов в организме человека, а также исходам изучения рациональных методов активации адаптивных систем мозга здорового и больного человека. Это все было бы невозможно без таких русских физиологов, как И. М. Сеченов и И. П. Павлов, которые являются авторами теории условных рефлексов.

В XX в. эти темы изучали К. М. Быков, П. К. Анохин, Н. П. Бехтерева, которые приблизились к понятию «биологическая обратная связь», но активное изучение метода началось лишь в конце 1950-х гг.

Первыми в разработке методов БОС в России стали ученые Научно-исследовательского института экспериментальной медицины Российской академии медицинских наук. В нем уже более 30 лет проводятся систематические исследования по поводу эффективности БОС в медицине [5].

Цель работы — дать обзор современных технологий биологической обратной связи для проблем нейрореабилитации, выявить современные направления развития и оценить их актуальность

Материалы и методы. Статьи собирались в поисковых системах PubMed, Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, опубликованные в период с 2019 по 2023 г. Ключевые слова для поиска: нейрореабилитация, биологическая обратная связь, неврология, мультимодальный сигнал. Всего найдено 67 полнотекстовых публикаций, после исключения дублирующих работ и несоответствующих целям работы к использованию принято 29 источников, одобренных всеми соавторами.

Результаты и обсуждение. Объектом регуляции физиологических функций с использованием метода БОС может стать любое из звеньев физиологического процесса в организме в зависимости от биологического сигнала, считываемого датчиками. В непрямой БОС существует несколько модификаций биоуправления.

1. Электромиографическая (ЭМГ) БОС. Обычно используется в терапии двигательных нарушений и релаксационного тренинга, когда расслабление мышцы достигается снижением мышечной активности, что обусловлено психической дезадаптированностью. Это способствует улучшению психического состояния пациента, что может иметь вспомогательный характер в период реабилитации. ЭМГ позволяет оценить проводимость импульса по нервам в ответ на его стимуляцию электрическим током [6–8].

Основной способ представления информации ЭМГ — визуализация физиологических сигналов организма человека и дальнейшее управление определенными игровыми ситуациями, которым обучается человек [8].

Особенно эффективным является ЭМГ БОС-тренинг при реабилитации тонкой моторики у пациентов с постинсультными нарушениями. Так,

в 2022 г. проведено исследование эффективности применения БОС в программах реабилитации с помощью оценки результатов динамики по шкале Ривермид, часть «Рука» (таблица). Результаты исследования позволили сделать вывод о том, что динамика на фоне проводимых реабилитационных мероприятий, где применялась реабилитационная схема на аппарате с БОС, была более выраженной, что говорит о превосходстве метода над стандартной терапией [8, 9].

Таблица

Результаты исследования «Динамика моторики», шкала Ривермид, 2022 г.

Тип реабилитации	До	После
Без применения БОС	7,51±0,49	8,89±0,59
С применением БОС	7,25±0,58	10,22±0,95

В настоящее время в нейрореабилитации также активно используется аппарат HandTutor. Он применяется при восстановлении функций кисти и пальцев вследствие неврологических заболеваний. Использование такого аппарата показало эффективность в лечении постинсультного гемипареза: степень доказательности 1a (наивысший уровень эффективности), отдельные работы свидетельствуют об улучшении речи и глотания (1b), — в то время как уровень доказательности при лечении других нейропсихологических нарушений варьирует от 2a до 3 [9, 10].

II. Электроэнцефалографическая (ЭЭГ) БОС. Эта методика тренинга часто используется в реабилитации для изменения уровня концентрации внимания пациента на каком-либо предмете, а также для контроля уровня эмоционального возбуждения.

Применение такой модификации является достаточно актуальным и распространенным, т. к. используется при коррекции психоэмоциональных нарушений, задержке нервно-психического развития, неврозах, депрессии, нарушениях сна, панических атаках, гиперактивности и синдроме дефицита внимания, проблемах с обучаемостью без выраженных интеллектуальных отклонений.

Основной способ представления информации ЭЭГ — визуализация физиологических сигналов организма человека [11, 12].

Самым распространенным аппаратом, работающим по каналам ЭЭГ, является «БОСЛАБ». В 2015 г. проведено исследование, где у большей части пациентов (14 из 15) наблюдалась высокая приверженность БОС-тренингам. После окончания реабилитации отмечено повышение баллов:

- по Монреальской когнитивной шкале (*англ.* Montreal Cognitive Assessment, МОКА) — с (11,5±8,0) до (17,0±10,0) ($p = 0,002$);
- шкале лобной дисфункции — с (7,2±7,0) до (9,6±9,0) ($p = 0,075$);
- нейроментальному индексу — с (52,9±25,0) до (75,0±13,0) ($p = 0,002$).

В исследовании продемонстрирована возможность модуляции функциональной активности дефолтной сети головного мозга путем тренинга с БОС по инфранизким частотам ЭЭГ. Этот подход может быть использован у пациентов с повреждением головного мозга для восстановления когнитивных функций и эмоциональной регуляции в период реабилитации [12].

В работе Т. Кодамы и др. (*англ.* T. Kodama et al.) также представлен клинический случай положительного влияния ЭЭГ-тренинга на моторную зону неокортекса, что привело к повышению двигательной активности парализованных конечностей, снижению нейропатического болевого синдрома, коррекции нарушений образа тела с помощью мультисенсорной БОС на основе нейробиоуправления с визуализацией (*англ.* Imagery neurofeedback-based multisensory, iNems). Исследователями продемонстрирована возможность значимого восстановления пациентов в период реабилитации [13].

III. Дополнительные виды БОС. Используются в нейрореабилитации для контроля результатов, мотивации пациента.

1. БОС по параметрам, характеризующим деятельность сердечно-сосудистой системы (артериальное давление (АД), частота сердечных сокращений (ЧСС), время распространения пульсовой волны). Основная решаемая задача этой модификации — коррекция психосоматической патологии, которая может препятствовать реабилитации (например, артериальной гипертензии, вегетативной дисфункции, психогенного нарушения сердечного ритма). Тренинг основан на управлении одним выбранным параметром: частотой пульса, или амплитудой бета-ритма ЭЭГ, или концентрацией CO_2 в выдыхаемом воздухе. Основным способом представления информации при такой модификации также является визуализация физиологических сигналов [8, 9].

Комплекс «БОС-Тест» включает в себя модуль «БОС Пульс», регистрирующий ЧСС посредством фотоплетизмограммы с ногтевой фаланги пальца. На основании данных исследования Г. Н. Ануфриева и др. можно сделать вывод о повышении адаптационных возможностей вегетативной нервной системы в результате БОС-тренингов, что влечет за собой повышение реабилитационного потенциала организма человека и является лишь вспомогательным компонентом в период реабилитации [10].

2. БОС по температуре и электрической активности кожи (*англ.* Electrodermal Activity, EDA). Кожно-гальваническая реакция (*англ.* Galvanic Skin Response, GSR) также описана как EDA. Датчик GSR в этом случае используется для считывания величины и амплитуды кожно-гальванической реакции человека. Используется для обучения управлению стрессом и последствиями его влияния на организм человека, что также оказывает положительный вспомогательный эффект во время реабилитации. Снижение уровня психоэмоционального напряжения осуществляется посредством приобретения навыка произвольного контроля за температурой кончиков пальцев ко-

нечностей как эффективного способа расширить сосуды конечностей, повысить периферическое сопротивление.

Два исследования связаны с эффективным использованием биологической обратной связи GSR для управления стрессом при восстановлении функций пациента во время реабилитации. Датчики GSR измеряют едва заметные изменения проводимости кожи, которые указывают на колебания уровня возбуждения человека через вегетативную нервную систему [11]. Посредством снижения стресса у пациента выравнивается психоэмоциональный фон, что благоприятно влияет на процесс реабилитации [10]. Основным способом представления информации при такой модификации — визуализация физиологических сигналов организма человека и аудиологическое представление (например, сознательное понижение температуры кожи рук заставит воздушный шар опуститься или звучать музыку тише) [8, 10, 14, 15].

3. БОС по респираторным показателям. Также успешно используется для управления над стрессом в период реабилитации. Система биологической обратной связи с датчиком дыхания измеряет и предоставляет информацию, связанную с параметрами дыхания (глубина и частота), чтобы помочь пользователям овладеть определенными навыками для расслабления и снятия стресса.

Изменения параметров дыхания могут напрямую управлять звуком в режиме реального времени [12] или размером кругового рисунка на экране [13]. Кроме того, из необработанных данных можно извлечь дополнительные параметры дыхания, такие как частота и глубина дыхания. Эти параметры дыхания часто используются для управления или настройки отображения обратной связи, например, для управления игровыми интерфейсами [12], регулировки уровня разнообразия в играх [13] и регулировки музыкальных качеств [14]. В исследовании 2011 г. среднее время вдоха и выдоха используется для синтеза музыкальных паттернов в реальном времени с дифференцированными звуками «вдох» и «выдох» [15]. Один из аппаратов, использующихся в настоящее время и имеющих такой канал, — система БОС «Колибри».

По результатам большого количества современных исследований аппаратные технологии с одноканальной БОС являются хорошим дополнением к различным реабилитационным методикам и имеют достаточную эффективность. Однако одноканальная БОС может воздействовать лишь на одно звено, в то время как реабилитация — это комплексное восстановление нескольких функциональных звеньев человеческого организма. Лишь объединив одноканальные виды БОС в мультимодальную систему, клиницисты могут добиться максимального эффекта от такой методики в кратчайшие сроки.

IV. Мультимодальная БОС (англ. Multybiofeedback). Является наиболее информативным методом, существенно расширяющим эффективность лечения и реабилитации различных психоневрологических и моторных нарушений [13–15].

Методы, основанные на мультимодальной БОС, относятся к наиболее эффективным способам оптимизации воздействия при помощи различных технологий лечения. Причиной этому является структура многочастотных кодов биопреуправления физиологическими процессами человека. Преимуществом такой системы является интеллектуальная математическая модель, описывающая реальные параметры мышцы, биопотенциалов мозга или ЧСС перед началом сеанса БОС-тренинга. Эта модель, являясь базовой опорной сигнальной системой, позволяет подстраиваться под индивидуальные характеристики пациента, что повышает точность физиологического восприятия и способствует выработке правильного тренировочного паттерна.

Такая обратная связь помогает пользователям научиться совершенствовать навыки саморегуляции посредством практики контроля этой деятельности. Например, данные GSR используются для обучения регуляции возбуждения при реабилитации [16], респираторные данные — для регуляции дыхания [17, 18], данные ЭЭГ и ЭМГ — непосредственно для восстановления двигательных и когнитивных функций. Остальные биоданные в основном используются в качестве вторичной информации, указывающей на результаты обучения биологической обратной связи. Например, данные деятельности сердечно-сосудистой системы и температуры в системе биологической обратной связи могут указывать на результаты тренировки релаксации [13, 19–21].

Как показали результаты исследования на базе Московского областного научно-исследовательского клинического института имени М. Ф. Владимирского, повторные курсы лечения с применением программы мультимодальной системы были эффективными и безопасными для пациентов в восстановительном периоде после перенесенного инсульта. После каждого из двух курсов комплексного лечения отчетливо отмечалось статистически значимое изменение показателей, свидетельствующее об улучшении в состоянии больных, прослеживалась положительная динамика в восстановлении когнитивных функций (по данным обследования в динамике по шкале МоСА ($p < 0,01$)). Улучшение памяти отмечено по тесту «Запоминание 10 слов» по методу А. Р. Лурии ($p < 0,01$, $p < 0,05$); конструктивно-пространственных навыков — по субтесту № 9 «Кубики Коса» теста Векслера ($p < 0,01$); концентрации внимания — по таблицам Шульте ($p < 0,01$, $p < 0,05$), способности к когнитивной переключаемости — по тесту Струпа ($p < 0,01$, $p < 0,05$). Улучшалось эмоциональное состояние пациентов, наблюдался регресс депрессивных нарушений, согласно данным обследования по госпитальной шкале тревоги и депрессии (*англ.* Hospital Anxiety and Depression Scale, HADS) ($p < 0,01$) [18, 22].

Именно мультимодальное воздействие, сочетание традиционных и современных высокотехнологичных методов лечения могут оказать эффективное влияние на процесс восстановления.

Новая концепция — от статичной БОС к целенаправленной мультимодальной системе. Одной из основных целей реабилитации является восстановление способности пациентов с двигательным дефицитом выполнять функциональные задачи. Это нужно, чтобы облегчить жизнь пациентам, сделать ее независимой от окружающих людей. Обучение выполнению задач должно быть связано с четко определенной функциональной целью. В нейромоторной реабилитации целенаправленное обучение побуждает пациента исследовать окружающую среду и решать конкретные двигательные проблемы. Таким образом, эффективная БОС-терапия для пациентов с двигательным дефицитом должна отслеживать и корректировать систему динамических движений, а не полагаться главным образом на статический контроль активности одной мышцы или одного сустава.

Предположим, что тренировочная задача для пациента с гемипарезом состоит в том, чтобы дотянуться до чашки кофе и взять ее, используя только пораженную руку. Последние модели управления двигательными процессами предполагают, что мозг может управлять кинематикой конечностей при выполнении поставленной задачи путем смещения точек равновесия или создания «виртуальной траектории» конечной точки. Следовательно, траектория движения руки может быть более значимой переменной БОС, чем мышечная активность. В дополнение к перемещению рук успешные действия по достижению конечной точки и хватанию также требуют ориентации рук, позволяющей выровнять ось противопоставления большого пальца с осью объекта. Эти переменные следует учитывать при разработке вариантов динамической обратной связи для облегчения контроля конечностей [23–27].

Эффективная система БОС, ориентированная на выполнение задач, требует организованной обратной связи по множеству переменных, которые характеризуют выполнение задачи, не подавляя восприятие и когнитивные способности пациента. Полезная система БОС для обучения повторяющимся задачам в нейромоторной реабилитации требует наличия сложной технологии сенсорного слияния и презентации, чтобы быть доступной для внедрения. К счастью, технологии в этой области значительно продвинулись со времени ранних исследований биологической обратной связи [28–30].

Новые технологии и приложения для БОС. Подход информационного (сенсорного) слияния является одним из способов к уменьшению информационной перегрузки пациентов во время терапии БОС. Объединение информации включает в себя интеграцию динамичного и изменчивого потока информации из мультимодальных источников и нескольких местоположений для определения состояния контролируемой системы. Объединение информации может происходить на разных уровнях, включая уровень сбора данных (числовая или символьная информация), обработки информации (например, функций и решений) и моделирования. Этот подход полезен, по-

тому что он имитирует человеческий интеллект. В результате это повышает надежность машинного восприятия или принятия решений и управления динамическими системами каждым модулем [31].

Заключение. Технология БОС в медицине применяется редко из-за сложных протоколов обучения и психического перенапряжения пациента во время выполнения заданий. Все существующие устройства БОС используют только один основной канал для обратной связи, чаще всего ЭЭГ, ЭКГ, ЭМГ. Сегодня же в научном сообществе обсуждаются усовершенствованные подходы к достижению целей нейрореабилитации. Одним из таких подходов является мультимодальная биологическая обратная связь.

Наш научный коллектив ведет разработку аппаратно-программного комплекса для нейрореабилитации различных психоневрологических нарушений, таких как последствия травмы мозга, инсульта, депрессивно-тревожных расстройств, задержка развития когнитивных навыков у детей, нейродегенеративные заболевания. Также в наших планах реализовать принципы мультимодальной БОС в иммерсионной среде (виртуальной реальности).

Список источников

1. Анохин П. К. Узловые вопросы теории функциональной системы. М. : Наука, 1980. 196 с.
2. Бачкала А. П., Митина О. В. Биологическая обратная связь как опосредующий знак бессознательно протекающих процессов. Новые внутрипсихические возможности человека // История, современность и перспективы развития психологии в системе Российской академии наук. 2022. С. 496–498. EDN: <https://elibrary.ru/qggrgx>.
3. Грибова В. В., Стрекалёв В. О. Инструментальный комплекс для иммерсивных виртуальных тренажеров с биологической обратной связью // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2020. Т. 17, № 8. С. 19–28. DOI: <https://doi.org/10.14489/vkit.2020.08.pp.019-028>.
4. Ринчинова Я. Т., Перминова А. Э. Управление физиологическим состоянием человека на основе биологической обратной связи // Медицинские технологии и оборудование. Чита : ЗабГУ, 2019. С. 26–29. EDN: <https://elibrary.ru/zfgqvww>.
5. Богданов О. В. Эффективность различных форм сигналов обратной связи в ходе лечебных сеансов функционального биоуправления // Физиология человека. 1990. Т. 16, № 1. С. 13–18.
6. Biofeedback Game Design: Using Direct and Indirect Physiological Control to Enhance Game Interaction / L. E. Nacke, M. Kalyn, C. Lough, R. L. Mandryk // Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Fac-

- tors in Computing Systems. New York : Association for Computing Machinery, 2011. P. 103–112. DOI: <https://doi.org/10.1145/1978942.1978958>.
7. Плишкина Е. А., Бейн Б. Н. Особенности динамики депрессивных расстройств у пациентов с ишемическим инсультом при стабилметрическом тренинге // Вятский медицинский вестник. 2018. № 3. С. 36–40. EDN: <https://elibrary.ru/vnodmg>.
 8. Biofeedback Therapy / T. Patcharatrakul, P. Pitisuttithum, S. S. C. Rao, S. Gonlachanvit // Clinical and Basic Neurogastroenterology and Motility. Academic Press, 2020. P. 517–532. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813037-7.00037-6>.
 9. Лупанова К. В., Колбахова С. Н., Сидякина И. В. Эффективность реабилитации тонкой моторики у пациентов с постинсультными нарушениями с использованием аппарата биологической обратной связи / К. В. Лупанова, С. Н. Колбахова, И. В. Сидякина // Сборник статей V Научно-практической конференции «Научный авангард» и Межвузовской олимпиады ординаторов и аспирантов. М. : ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России, 2023. С. 123–128. EDN: <https://elibrary.ru/sqrkdm>.
 10. Jang T.-J., Jeon I.-C. Effects of Vibration-Based Biofeedback on Multifidus Muscle Activity and Pelvic Tilt Angle in Subjects with Hip Flexion Limitation // Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation. 2023. Vol. 37, No. 1. P. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.3233/BMR-220284>.
 11. Влияние «БОС-пульс»-тренингов на гипоксическую устойчивость / Г. Н. Ануфриев, М. И. Зинченко, В. В. Гулятьева [и др.] // Ульяновский медико-биологический журнал. 2019. № 3. С. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2019-3-63-71>.
 12. Электроэнцефалографические маркеры функционального состояния центральной нервной системы в спортивной практике / Н. В. Балиоз, Е. Е. Архипова, Н. В. Мозолева, С. Г. Кривошеков // Ульяновский медико-биологический журнал. 2023. № 3. С. 30–48. DOI: <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2023-3-30-48>.
 13. Карпачевская Г. Ф., Суворова Р. А., Шарипов А. Р. Сравнительная эффективность БОС-процедур, используемых при различных видах офтальмопатологии // Современные технологии в офтальмологии. 2020. № 4. С. 24–25. DOI: <https://doi.org/10.25276/2312-4911-2020-4-24-25>.
 14. Shi Y., Wu W. Multimodal Non-invasive Non-pharmacological Therapies for Chronic Pain: Mechanisms and Progress // BMC Medicine. 2023. Vol. 21, Art. No. 372. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12916-023-03076-2>.
 15. Исакова Е. В., Слюнькова Е. В. Эффективность повторных курсов программы мультимодальной стимуляции в коррекции когнитивных и эмоциональноповеденческих нарушений после инсульта: когортное

- проспективное исследование // *Фарматека*. 2020. Т. 27, № 3. С. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.18565/pharmateca.2020.3.71-77>.
16. Adaptive Model for Biofeedback Data Flows Management in the Design of Interactive Immersive Environments / P. V. Gomes, A. Marques, J. Donga [et al.] // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, Iss. 11, Art. No. 5067. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11115067>.
 17. Navarro D., Sundstedt V., Garro V. Biofeedback Methods in Entertainment Video Games: A Review of Physiological Interaction Techniques // *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*. 2021. Vol. 5, Iss. CHI PLAY, Art. No. 268. DOI: <https://doi.org/10.1145/3474695>.
 18. Treatment of Medial Medullary Infarction Using a Novel iNems Training: A Case Report and Literature Review / T. Kodama, O. Katayama, H. Nakano [et al.] // *Clinical EEG and Neuroscience*. 2019. Vol. 50, Iss. 6. P. 429–435. DOI: <https://doi.org/10.1177/1550059419840246>.
 19. Kaewcum N., Siripornpanich V. An Electroencephalography (EEG) Study of Short-Term Electromyography (EMG) Biofeedback Training in Patients with Myofascial Pain Syndrome in the Upper Trapezius // *Journal of Physical Therapy Science*. 2020. Vol. 32, No. 10. P. 674–679. DOI: <https://doi.org/10.1589/jpts.32.674>.
 20. Реализация метода мультипараметрической биологической обратной связи с помощью портативного устройства на базе сети микроконтроллеров / Ф. Г. Дадашев, А. Р. Аллахвердиев, К. Г. Дадашева, Х. И. Абдуллаев // *Технологии живых систем*. 2021. Т. 18, № 2. С. 71–76. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700997-202102-09>.
 21. Суворова Р. А., Карпачевская Г. Ф., Шарипов А. Р. Особенности применения метода биологической обратной связи в клинической практике // *Антология российской психотерапии и психологии*. Санкт-Петербург, 2019. С. 86–92. URL: <https://clck.ru/396QWh> (дата обращения: 02.10.2023).
 22. Капилевич Л. В. Физиологические особенности формирования двигательной координации на основе тренировок с биологической обратной связью / А. В. Илларионова, С. Г. Кривошеков, А. А. Ильин, Л. В. Капилевич // *Физиология человека*. 2022. Т. 48, № 4. С. 5–21. EDN: <https://elibrary.ru/scyuof>.
 23. Можейко Е. Ю., Петряева О. В. Обзор исследований использования БОС-терапии при реабилитации и восстановительном лечении пациентов неврологического профиля // *Доктор.Ру*. 2021. Т. 20, № 9. С. 43–47. DOI: <https://doi.org/10.31550/1727-2378-2021-20-9-43-47>.
 24. Fageria O. P., Sharma S. Mathematical Model for Enhancement of Visual Acuity through Electronic System Biofeedback // *Journal of Advanced Research in Applied Mathematics and Statistics*. 2022. Vol. 7, No. 1–2. P. 12–17. DOI: <https://doi.org/10.24321/2455.7021.202204>.

25. Angelakis E., Andreopoulou A., Georgaki A. Multisensory Biofeedback: Promoting the Recessive Somatosensory Control in Operatic Singing Pedagogy // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2021. Vol. 66, Art. No. 102400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102400>.
26. Vasilyev V., Borisov V., Syskov A. Biofeedback Methodology: A Narrative Review // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). IEEE, 2019. P. 0011–0016. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958019>.
27. Щербина Н. В. Обзор методов исследования физиологических показателей, используемых в системах с биологической обратной связью // *Эргодизайн*. 2023. № 1. С. 81–89. DOI: <https://doi.org/10.30987/2658-4026-2023-1-81-89>.
28. Стрекалев В. О., Грибова В. В. Подсистема воспроизведения иммерсивных виртуальных тренажеров с биологической обратной связью // *Программные продукты и системы*. 2023. Т. 36, № 2. С. 286–292. DOI: <https://doi.org/10.15827/0236-235X.142.286-292>.
29. Lüddecke R., Felnhofer A. Virtual Reality Biofeedback in Health: A Scoping Review // *Applied Psychophysiology and Biofeedback*. 2022. Vol. 47. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10484-021-09529-9>.
30. Имуков А. Ю. Сравнительный анализ нейронных сетей для систем с биологической обратной связью // *Научный аспект*. 2020. Т. 14, № 2. С. 1780–1783. EDN: <https://elibrary.ru/qcnsnf>.
31. Exploring Public Attitude Toward Biofeedback Technologies: Knowledge, Preferences and Personality Tendencies / G.A. Russo, S. Oliveri, C. Cincidda, [et al.] // *Journal of Public Health Research*. 2020. Vol. 9, No. 4. DOI: <https://doi.org/10.4081/jphr.2020.1782>.

Информация об авторах

Елизавета Михайловна Тарасова — студент педиатрического факультета, Уральский государственный медицинский университет (Екатеринбург, Россия). E-mail: tarasovaeliza008@yandex.ru.

Тимур Сергеевич Петренко — кандидат медицинских наук, доцент, заведующий лабораторией нейрокогнитивных технологий, Уральский государственный медицинский университет (Екатеринбург, Россия). E-mail: ts.petrenko@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7328-9894>.

Василий Ильич Борисов — доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия). E-mail: v.i.borisov@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0486-7552>.

Information about the authors

Elizaveta M. Tarasova — Student of the Faculty of Pediatrics, Ural State Medical University (Ekaterinburg, Russia). E-mail: tarasovaeliza008@yandex.ru.

Timur S. Petrenko — Candidate of Sciences (Medicine), Assistant Professor, Head of the Laboratory of Neurocognitive Technologies, Ural State Medical University (Ekaterinburg, Russia). E-mail: ts.petrenko@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7328-9894>.

Vasily I. Borisov — Associate Professor, Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia). E-mail: v.i.borisov@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0486-75527>.