

УДК 612.8; 159.9

Шелепин Ю.Е., Муравьева С.В., Лебедев В.С., Васильев П.П., Шелепин Е.Ю.

Институт Физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

Технология «когнитивной реабилитации»¹

Technology of "Cognitive Rehabilitation"

Аннотация

Создана технология реабилитации пациентов с нарушениями психических функций самого разного генеза (например: по МКБ-10 цереброваскулярные заболевания I60-I69; психические расстройства F00-F99, легкие когнитивные расстройства F06.7 и др.). Регулярно проводимый электрофизиологический и психофизический мониторинг состояния пациента демонстрирует эффективность «когнитивного тренинга» с использованием метода «i-Pavlovian Cognitive Training»). Технология сочетает использование виртуальной среды и ее контекста, как целеобразующего фактора, синхронизированного с двигательной нагрузкой (движущаяся беговая дорожка или велотренажер), то есть с движением пациента в виртуальной среде с условно-рефлекторным подкреплением. В виртуальной среде создаются ситуации, требующие от пациента принятия решений о выходе из них с максимальной концентрацией внимания на достижении цели. В основу предлагаемой технологии восстановления заложены такие функции мозга, как оценка вероятности оптимального выбора направления движения, оценка вероятности опасности или правильности выбора цели. Эти основные функции целенаправленной деятельности обеспечивают дорсальные и вентральные зрительные нейронные сети. Их работа происходит на осознанном и неосознанном уровне и описывается нами при помощи двух известных алгоритмов, обеспечивающих императивный и декларативный тип деятельности. Управление и перестройка этих алгоритмов возможна в процессе тренинга, в условиях осознанного и неосознанного восприятия. Реабилитационная технология названа «i-Pavlovian Cognitive Training» и является примером эффективной конвергенции человека и искусственного интеллекта, направленного на восстановление когнитивных, эмоциональных (аффективных) и волевых (конативных) процессов, и предназначена для повышения стрессоустойчивости и реабилитации.

Ключевые слова: когнитивные, конативные и аффективные процессы; шизофрения; депрессия; когнитивная реабилитация; электрофизиологические маркеры реабилитации

Abstract

The technology for the rehabilitation of patients has been created that combines the use of a virtual environment and its context as a goal-forming factor synchronized with a motor load (a moving treadmill or exercise bike), that is, with the movement of a patient in a virtual environment with conditioned reflex reinforcement. In a virtual environment, situations are created that require the patient to make decisions about getting out of them with the maximum concentration of attention on achieving the goal. The proposed recovery technology is based on such brain functions as assessing the probability of optimal choice of direction of movement, assessing the probability of danger or the correctness of the choice of target. These main functions of goal-directed activity are provided by dorsal and ventral visual neural networks. Their work takes place on a conscious and unconscious level and is described by us using two well-known algorithms that provide an imperative and a declarative type of activity. Management and restructuring of these algorithms is possible in the process of training, in conditions of conscious and unconscious perception. Rehabilitation technology, named "i-Pavlovian Cognitive Training", is an example of effective convergence of a person and artificial intelligence, aimed at restoring cognitive, emotional (affective) and volitional (conative) processes and is designed to increase stress resistance and rehabilitation.

Keywords: cognitive, conative and affective processes; schizophrenia; depression; cognitive rehabilitation; electrophysiological markers of rehabilitation

¹ Важнейший, завершающий этап работы над статьей был выполнен при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-921 от 13.11.2020 г. о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научного центра мирового уровня «Павловский центр "Интегративная физиология – медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям стрессоустойчивости"».

Введение

Исследования в области психофизиологии позволили разработать общие принципы функционального восстановления пациентов, страдающих ухудшением познавательно-эмоциональных способностей. Предлагаемый нами принцип реабилитации психических функций основан на ключевых психофизиологических процессах, определяющих биологическое и социальное поведение человека. К ним относятся сенсорно-познавательные и сенсорно-аффективные процессы; внутренние конативные (волевые) решения, механизмы принятия решений, планирования и выполнения действий. Все эти процессы и механизмы их обеспечения тесно связаны между собой, так как целостное поведение человека и его когнитивные функции неразрывно связаны с аффективными (эмоциональными) и конативными (волевыми) процессами.

Мы назвали разрабатываемую нами новую систему реабилитации «i-Pavlovian cognitive training system». Эта система является новым направлением, связанным с сенсорной физиологией и искусственным интеллектом. Несмотря на то, что в названии звучит лишь система когнитивного обучения, она включает и конативные, и аффективные составляющие. Новая система реабилитации основана на фундаментальных принципах обучения: подражательном, поучительном и конструктивном. При этом конструктивная деятельность формирует у человека перестройку нейронных сетей. Для формирования этой перестройки мы используем возможности каналов зрительной системы, обеспечивающих передачу осознаваемой и неосознаваемой информации, так как «конструкция зрительного мозга» является основой организации мыслительных процессов (Глезер, 1993). Однако передача только зрительной, как и любой другой сенсорной информации недостаточна для перестройки деятельности человека. Зрительные процессы запускают только алгоритмы декларативного и императивного планирования действия в оппонентных, дорзальных и вентральных нейронных сетях, которые затем включают процессы принятия

решений и планирования действий на основании полученной осознанной и неосознанной информации. Общий принцип построения системы восстановления психического здоровья напоминает стандартные условия проведения фитнеса, которые сами по себе оказывают реальную помощь без привлечения сложного управления с помощью зрительных сигналов. В то же время, самостоятельное стремление пациента к творческой целенаправленной деятельности в спорте, в труде и других сферах возможно и эффективно лишь при сохранности конативных и аффективных процессов, которые, к сожалению, нередко подавляет традиционная психофармакотерапия.

Методология разработанной системы

Цель написания данной статьи – описание психофизиологических основ новой технологии «i-Pavlovian cognitive training system» (Муравьева, Шелепин, 2017, 2018, 2019; Шелепин и др., 2016, 2018; Шелепин, 2017; Shelepin et al., 2020, 2021). Это интеллектуальная система, обеспечивающая диагностику, терапевтическое и реабилитационное воздействие, предназначенная для персонализированной медицины. На рисунке 1 схематично представлен принцип разработанной нами системы реабилитации и указаны основные функциональные связи системы.

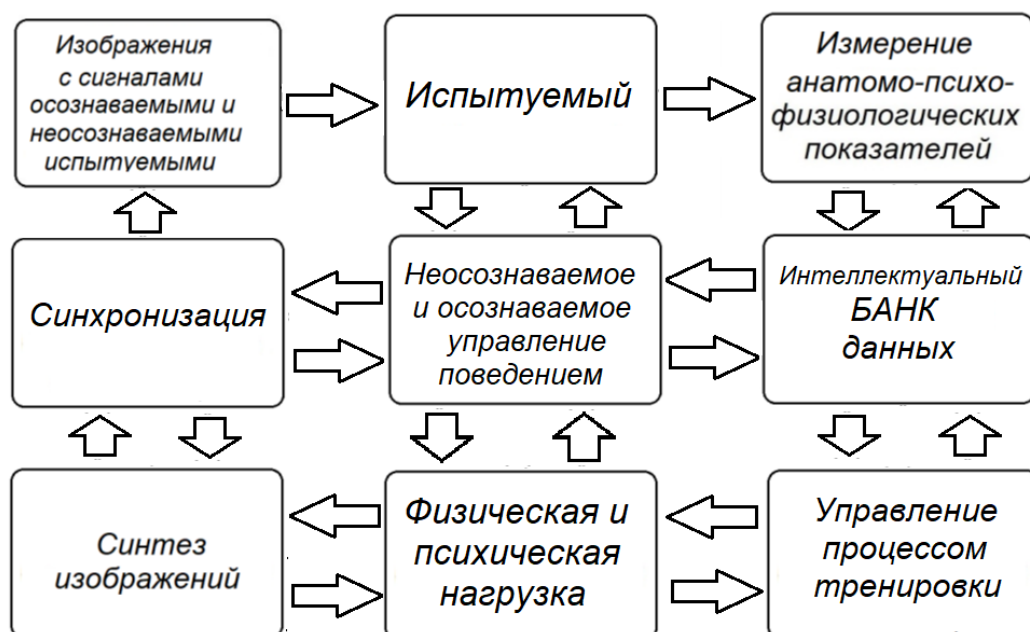


Рисунок 1 – Общая схема основных звеньев «i-Pavlovian cognitive training system»

На рисунке 1 показаны сенсорная, преимущественно зрительная стимуляция, а также использование зрительного сигнала в качестве системы управления. При этом, измерение психофизиологических параметров использует видеоролик как основной регулятор поведения пациента по каналам неосознаваемого восприятия (Муравьева, Шелепин, 2017, 2018, 2019; Шелепин и др., 2016, 2018; Шелепин, 2017; Shelepin et al., 2020, 2021). Необходимым звеном этой системы является управляемая компьютером ритмическая физическая нагрузка, в частности, велотренажер. Это важное звено ориентации пациента на пути к достижению цели за счет вовлечения пациента в деятельность в виртуальной или дополненной среде. Изменения содержания динамического зрительного образа виртуальной среды – вторая важная часть реабилитации, связанная с мышечными усилиями, служащая как обратной связью, так и физиологическим подкреплением формирования условного рефлекса для достижения «цели» в традиционном смысле (Павлов, 1923).

В предлагаемой системе технология виртуальной или дополненной реальности представляет собой удобную среду, которая моделирует условия целенаправленного поведения. В последние десятилетия виртуальная среда активно используется для лечения и реабилитации пациентов в неврологических клиниках мира. Были созданы тренажеры, восстанавливающие ориентацию и движение человека в окружающей среде (Wilson, Foreman, 1993; Foreman et al., 2004; Chawla, Foreman, 2011; Korallo et al., 2012; Sandamas, Foreman, 2015). Они были впервые предложены Найджелом Форманом с сотрудниками и ориентированы на стимуляцию зрительной дорсальной нейронной сети для лучшей ориентации в окружающем пространстве. В этих исследованиях сравнивали точность оценки операторами пространственной информации при работе в виртуальной и реальной среде. Было показано, что приобретенные навыки ориентирования в пространстве виртуальной среды переносятся на ориентирование в эквивалентной ему реальной среде. Этот перенос изучали

не только у здоровых испытуемых, но и у детей, пожилых испытуемых и взрослых с ограниченными физическими возможностями, плохо ориентирующихся в сложно организованном пространстве. С помощью предварительного обучения в виртуальной среде показана эффективность восстановления целенаправленной деятельности пациентов. Эта предварительная подготовка облегчала дальнейшее поведение в сложной среде реального мира (Wilson, Foreman 1993; Pyles, Stanziano, 2001; Stanton et al., 2000, 2002; Sandamas, Foreman, 2015).

Дополненная реальность используется и для реабилитационной терапии пациентов после инсультов с целью улучшения их состояния и качества жизни. Так, для таких пациентов применяется зрительное копирование сложных движений пациента в виде «танцующего человечка» как сигнала обратной связи для тренировки качества движений пациента. Э. Пелах разработал систему, улучшающую походку и визуальный контроль осанки и ходьбы (Allen et al., 2012; Durgin, Pelah, 1999; Pelah, Thurrell, 2001; Pelah et al., 2002; Durgin, Pelah, 2005; Nanapragasam, Pelah, 2009; Casey, Pelah, 2010; Pelah et al., 2015).

Другая система для восстановления после инсультов была предложена В.И. Скворцовой и ее коллегами (Скворцова и др., 2010). Методика Скворцовой предназначена для начала реабилитационной терапии после инсульта и подходит даже для применения в остром периоде при грубых нарушениях движений. Авторы используют визуальную биологическую обратную связь (ОСБ) и виртуальную среду, для чего на голову пациента надеваются очки и шлем. Кроме того, на голову, туловище и область таза пациента устанавливаются датчики движения. Некоторые проблемы у пациентов возникают из-за использования 3D-очков или шлема виртуальной реальности, которые у многих пациентов вызывают побочные эффекты: усталость глаз, головокружение, тошноту, вследствие чего может резко ухудшиться общее состояние.

В нашем подходе к реабилитации, помимо внешних факторов зрительной стимуляции, большое значение имеют внутренние факторы, такие как цель и поддерживающие ее волевые процессы. Поддержание стремления к цели – это выработка условного рефлекса в головном мозге, а именно, выработка временных связей. Формирование временных связей между нейронами мозга как основа обучения, была впервые предложена аспирантом И.П. Павлова Борисом Бабкиным (Бабкин, 1904). Было показано, что для устойчивой выработки условного рефлекса необходим принцип подкрепления (Бабкин, 1904; Павлов, 1923).

Общепризнано, что традиционное улучшение когнитивных функций достигается путем рекомендации пациентам с небольшим умственным дефицитом заучивать стихи, разгадывать кроссворды, играть в шахматы и т.д. (Klimova et al., 2021; Jahn et al., 2021). Такие методы тренируют вентральные зрительные нейронные сети и обеспечивают их обучение.

Одним из современных методов надежной оценки хода обучения по выработке навыков зрительного поиска являются методы на основе измерений характеристик движения глаз. Во всех областях человеческой деятельности умение быстро решать задачи зрительного поиска уменьшает количество движений глаз при поиске цели. Механизм управления развитием зрительного навыка заключается в обучении оператора распознаванию цели как размытого изображения (низкой пространственной частоты), которое воспринимается рецептивными полями периферического зрения для управления взглядом. Это управление подразумевает наведение на цель фовеальной области сетчатки с высоким пространственным разрешением (Skuratova et al., 2021). Именно этот принцип управления поведением с помощью предварительного низкочастотного анализа является важной частью тренировки зрительной системы для достижения цели.

Во время тренировок мы ставили перед пациентом задачу, согласно которой он должен был в виртуальной среде принять решение, обеспечивающее достижение цели в условиях неопределенности.

Особенности тренинга заключались в развитии как пространственной ориентации, так и способности к обнаружению и распознаванию объектов. Именно совместное выполнение двух задач пространственной ориентации и распознавания обнаруженных объектов, обеспечивали пациенту понимание содержания стоящей перед ним задачи.

Состояние пациента контролировали, измеряя важные психофизиологические параметры: до и после тренировки определяли пространственно-временные частотные характеристики тестовых изображений, осознаваемое и неосознаваемое распознавание объектов живой и неживой природы, регистрировали ЭЭГ, когнитивные вызванные потенциалы. В последнее время начали применять метод инфракрасной спектроскопии мозга (NIRS). Для нашей методики был создан аппаратно-программный восстановительный комплекс, включающий в себя компьютер с большим панорамным дисплеем, установленный перед пациентом. Изображения демонстрировались на большом дисплее, позволяющем, благодаря размеру экрана, погрузить пациента в виртуальную среду. Пациенты могли виртуально путешествовать, играть в игры и обеспечивать интерактивное общение. На экран синтезировали и включали в сюжет «скрытые» управляющие сигналы для синхронизации обработки психофизиологических данных.

Важной частью этого комплекса является велотренажер или беговая дорожка для вовлечения пациентов в активную физическую деятельность. В качестве павловского подкрепления мы использовали результат индуцированной пациентом физической нагрузки. Мышечная работа улучшает кровообращение, что чрезвычайно важно для головного мозга. Важно отметить и то, что при физической нагрузке выделяются биологически активные вещества – эндорфины и нейротрофические факторы. Все это связано с активацией «систем удовольствия» в мозге (см. обзор Поляков, Ячменёва, 1981; Berridge, Kringelbach, 2015). Движение при этом работает как своеобразное павловское подкрепление в процессе

выработки условного рефлекса достижения цели, стимулируя центры удовольствия «эмоционального» мозга человека, нормализует нейротрофическую и эндокринную регуляцию.

В связи с тем, что пациент должен осуществлять реальное движение на беговой дорожке или велотренажере с регулируемой нагрузкой в соответствии с контекстом игры или видео, необходимо контролировать изменения нагрузки тренажера. На протяжении всего реабилитационного сеанса осуществлялся мониторинг физического, когнитивного и эмоционального состояния пациента с помощью ЭЭГ и психофизических измерений контрастной чувствительности. В последнее время начато измерение ЭКГ, проведение контроля движения глаз и регистрации мимики в ИК диапазоне. Режим нагрузки устанавливается и изменяется в зависимости от физического состояния человека. Стимулирующий компьютер синхронизирован с управляющим компьютером, который обеспечивает (по состоянию его зрительного восприятия и скорости достижения цели) систему контроля физиологических параметров, характеризующих общее физическое и эмоциональное состояние пациента. При этом выбор цели обусловлен задачей восстановления и количественных данных о состоянии головного мозга пациента. Это обеспечивает перестройку работы нейронных сетей, участвующих в зрительном восприятии, принятии решений и прогнозировании двигательной активности, а также стимуляцию и адаптационные возможности мозга, связанные с когнитивными функциями.

Разработанная и используемая «Программа виртуальной среды» представляет собой интерактивный видеоряд, имитирующий езду на велосипеде в виртуальном динамическом пространстве с различным ландшафтом. Ощущаются изменения в рельефе и наклон виртуальной дороги, синхронизированные с различными нагрузками на педали велотренажера.

Результаты реабилитационных тренировок показали, что совместное воздействие виртуальной среды и двигательной нагрузки формирует у

пациента «целевой рефлекс», т.е. идет формирование деятельности, направленной на достижение цели, с подкреплением в виде сопряженной мышечной активности. Используя терминологию Павлова, идет «подкрепление выработки целевого рефлекса» (Бабкин, 1904; Павлов, 1923). Этот принцип чрезвычайно важен в эффективной реабилитации пациентов, так как в результате достижения цели перестраивается работа всего организма, улучшается не только мышечная деятельность, но и состояние всех систем организма. Человек становится довольным предлагаемыми ему процедурами (данным методом), а это улучшает его качество жизни.

Важно отметить, что в нашем методе с помощью применения двигательной активности удастся восстановить (улучшить) психические когнитивные, конативные и аффективные функции головного мозга пациента, поэтому предлагаемый метод направлен на создание нейротехнологий для реабилитации пациентов с нейрокогнитивными расстройствами. Это достигается путем перестройки работы зрительной системы и включением в головном мозге тех временных и пространственно-частотных каналов, которые в данных пороговых условиях обеспечивают естественное сочетание осознанного и неосознанного описания среды и ориентации в данной среде. Также происходит обучение распознаванию в ней отдельных объектов и восприятию данной среды как единой целостной сцены с пониманием того, как в этой сцене необходимо передвигаться среди «реквизита и актеров». Для оценки сцены и роли, которую в ней играет «реквизит», и каждого из персонажей, необходимо извлечь из памяти значение персонажей и предметов, выделить положительные или отрицательные ассоциации, которые они вызывают в сознании при восприятии. Иными словами, наблюдатель должен принять решение об объекте – («это цель?»), а также выразить мысленно свое отношение к нему – («хорошо или плохо?»). Это решается с помощью ассоциаций, которые вызывает выбранный в качестве цели объект. Ответ на вопрос: «Что нужно

сделать для достижения цели?» формирует действия, обеспечивающие достижение цели.

Новые формулировки более полезны и для построения алгоритмов системы когнитивной реабилитации, которую мы предлагаем. Эти перефразированные нами вопросы более точно отражают функции зрительной дорсальной и зрительной вентральной нейронных сетей. Надо учитывать, что информация о сцене и объектах в этой сцене поступает в обе нейронные сети, хотя и с разным пространственным и временным разрешением. Заболевания с поражением преимущественно одной из этих сетей имеют различную клиническую симптоматику. В дорсальной сети наблюдаемая сцена согласуется со схемой тела и описанием относительно наблюдателя окружающей реальной или виртуальной среды. В вентральной сети наблюдаемая сцена согласуется с вероятностью опасности или пользы для субъекта наблюдателя. Таким образом, в дорсальной зрительной сети мозга происходит описание того, «где в этой сцене находится наблюдаемый объект» относительно наблюдателя, а в вентральной зрительной сети мозга – «что этот объект или сцена означает для наблюдающего субъекта». Эти процессы происходят как на осознанном, так и на неосознанном уровне. Поэтому и механизмы осознанного и неосознанного извлечения информации из памяти и различны, и схожи.

Если рассматривать человеческий мозг на уровне современных информационных технологий, то можно сравнить дорсальные и вентральные нейронные сети с двумя типами программирования: императивным, как описание того, как это делать, и декларативным, а именно – что делать. Традиционное использование императивных и декларативных языков программирования в настоящее время поддерживается в гибридном подходе к решению сложных задач. Обработку зрительной информации как модели двух типов психологических процессов в двух анатомо-физиологических каналах в головном мозге мы связываем с функциональным смыслом этих двух типов программирования. Осуществляя эту связь, мы получаем

возможность рассматривать нейронные сети как динамическую конструкцию, реализующую алгоритм осознанного и неосознанного восприятия, способствующий выживанию организма в сложных условиях эволюционно-исторического отбора. Для практики учет этих двух типов восприятия чрезвычайно важен. Неосознанное восприятие – это вход в мозг, программирующий поведение через интерфейс естественного зрения. Преобразуя программирование мозга и повторно активируя зрительные нейронные сети, он становится естественным клиническим инструментом для улучшения состояния пациента при всех заболеваниях так называемой «когнитивной сферы». Наша технология может быть адаптирована к любым заболеваниям, нарушающим процесс мышления, поведение и эмоциональную сферу человека. Поэтому наша система тренировок может быть использована при любом состоянии психического здоровья.

Контроль состояния пациента оценивается на основе очень субъективной психологической оценки когнитивного воздействия. Тем не менее, можно провести количественную оценку, используя метод масштабирования. Обычно такие оценки проводятся по школьной 6-балльной системе (от 0 до высшей оценки 5). В случае нашей методики реабилитации пациенты обычно дают наивысший балл. Возможно, это связано с побочными эффектами: отвлечением от скучного пребывания в больнице, а также улучшением общего состояния за счет активации системы кровообращения в результате работы мышц и т.д. Поэтому основное значение мы придаем объективным методам измерения: когнитивным вызванным потенциалам, ЭЭГ и перестройке локального кровоснабжения головного мозга по данным фМРТ и ИК-спектроскопии головного мозга.

Посмотрим, как результаты наблюдения за состоянием пациента демонстрируют эффективность метода «i-Pavlovian Cognitive Training». Мы измеряли когнитивные зрительные вызванные потенциалы в ответ на изображения объектов живой и неживой природы (Моисеенко и др., 2015, 2016; Муравьева и др., 2016, 2017, 2018; Муравьева, Шелепин, 2018).

У здоровых людей вызванные потенциалы на эти образы различаются (Моисеенко и др., 2015, 2016). Эти различия проявляются на ранних и поздних компонентах когнитивных вызванных потенциалов и зависят от длительности предъявления стимула. Зрительные когнитивные потенциалы на эти стимулы у пациентов с психическими расстройствами не имеют значимых отличий (Муравьева и др., 2017; Муравьева, Шелепин, 2018) (рисунок 2).

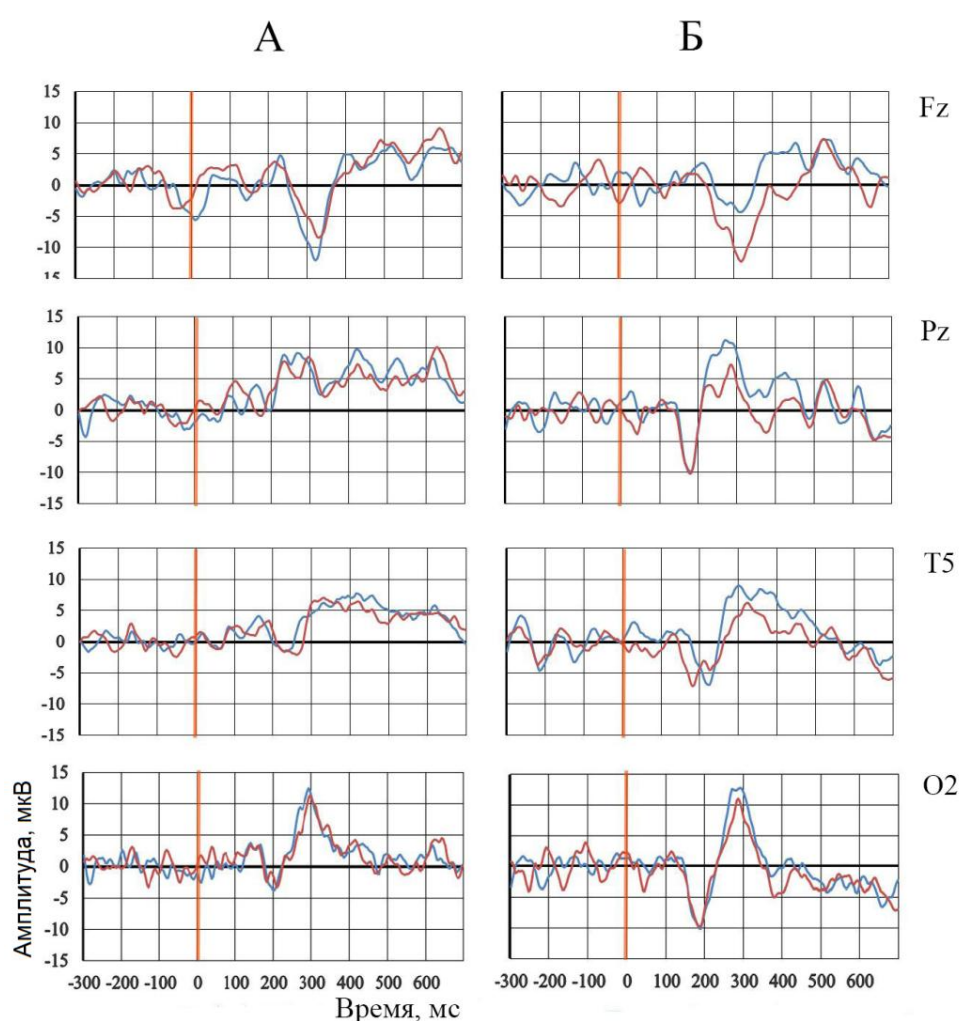


Рисунок 2 – Когнитивные вызванные потенциалы на предъявления контурных изображений длительностью 600 мс на примере одного пациента с параноидной формой шизофрении в различных отведениях: центральном лобном – Fz, центральном теменном – Pz, височном – T5 и затылочном – O2 до (А) и после (Б) двухнедельного курса тренировки. Линия синего цвета – вызванные потенциалы на стимулы изображений – объектов живой природы. Линия красного цвета – вызванные потенциалы на стимулы изображений – объектов неживой природы (Муравьева, Шелепин, 2018)

Графики усредненных когнитивных зрительных вызванных потенциалов при выполнении инструкции по различению смысловых признаков в образах у группы пациентов с шизофренией и контрольной группы были опубликованы ранее (Муравьева, Шелепин, 2018). В исследовании принимали участие 16 пациентов с параноидной формой шизофрении (F20 по МКБ-10) с продолжительностью заболевания от 1 до 10 лет – 8 мужчин и 8 женщин. Контрольную группу составили 16 здоровых испытуемых в возрасте от 18 до 30 лет – 9 мужчин и 7 женщин. У всех наблюдателей острота зрения была не менее 0,9, а рефракция соответствовала норме. Среди симптомов, которые наблюдались у большинства пациентов с шизофренией, участвовавших в исследовании, необходимо отметить эмоциональную однообразность, гипомимичность, напряженность и настороженность, тревожность. Среди типичных симптомов шизофрении в статусе всех пациентов отмечалась амбивалентность (двойственное, противоречивое отношение субъекта к объекту, характеризующееся одновременной направленностью на один и тот же объект противоположных «импульсов», возникающих внезапно и независимо от обстоятельств), симптомы «соскальзывания». Были характерны также бредовые идеи преследования, бредовые идеи воздействия, слуховые галлюцинации (голоса). Для пациентов было характерно доминирование продуктивных симптомов над негативными. Нарушения мышления и поведения не определяли клиническую картину обследованных пациентов.

Показано, что в центрально-лобном отведении (Fz), центральном отведении (Cz), центрально-теменном отведении (Pz), в затылочном отведении (усреднение по двум затылочным отведениям (O1 и O2) наиболее выраженные изменения характерны для поздних компонентов P350 – P500.

Похожие результаты мы наблюдаем после тренировки у группы пациентов с депрессией. На рисунке 3 представлены когнитивные

зрительные вызванные потенциалы группы пациентов с депрессией до и после применения метода «i-Pavlovian Cognitive Training».

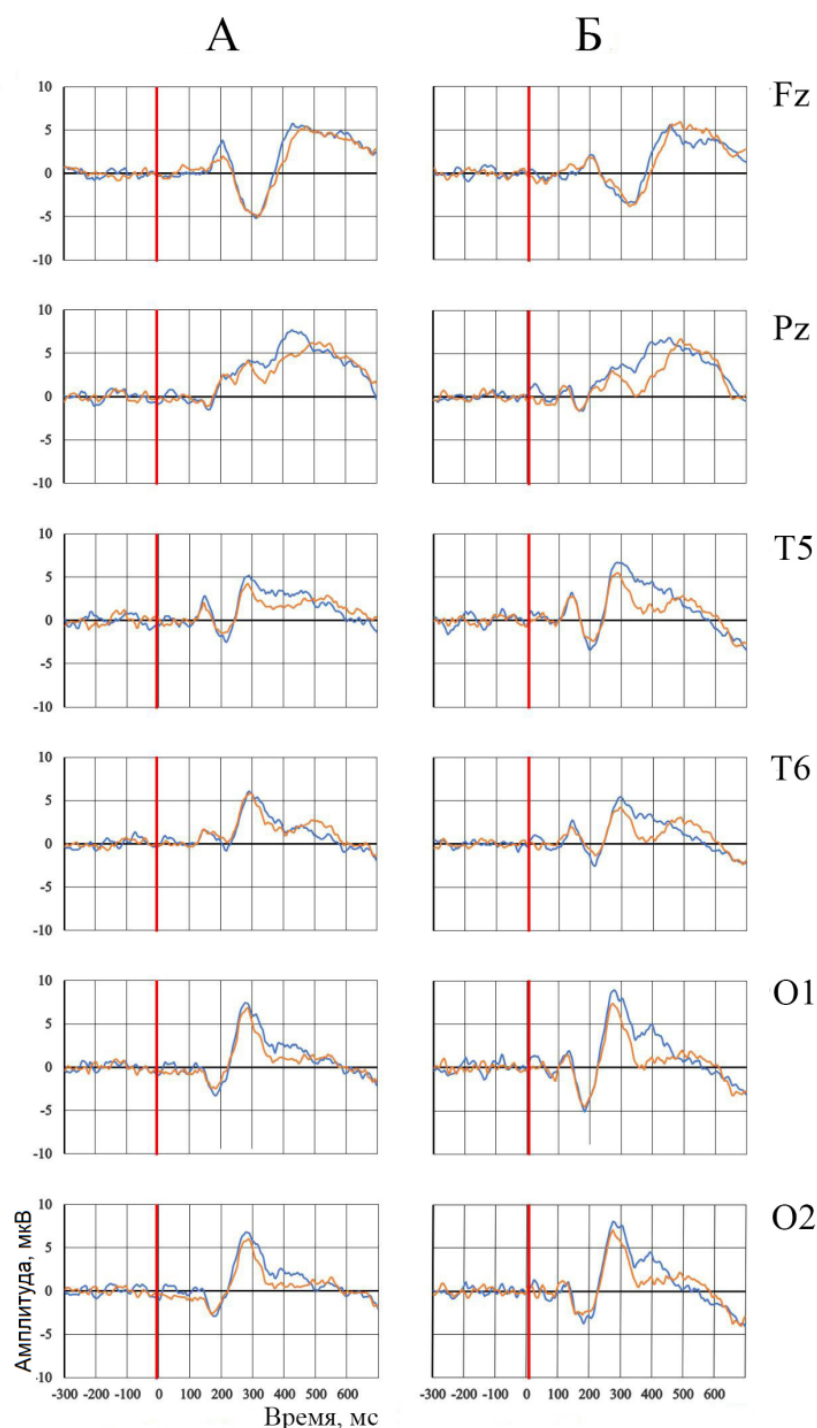


Рисунок 3 – Усредненные когнитивные вызванные потенциалы на предъявления контурных изображений у группы пациентов с депрессией в различных отведениях: центральном лобном – Fz, центральном теменном – Pz, височном – T5 и T6, затылочном – O1 и O2 до (А) и после (Б) двухнедельного курса тренировки. Линия синего цвета – вызванные потенциалы на стимулы изображений – объектов живой природы. Линия красного цвета – вызванные потенциалы на стимулы изображений – объектов неживой природы (Муравьева, Шелепин, 2018)

Группу пациентов с депрессией (F32; F33 по МКБ-10) составили случаи депрессивного эпизода и депрессивного эпизода в рамках рекуррентной формы депрессивного расстройства. В клинической картине абсолютного большинства пациентов, участвовавших в исследовании, выявлялись признаки витальной депрессии с разной степенью представленности проявлений меланхолии с беспричинным пессимизмом, унынием, подавленностью, а также витальной тоской, которую пациенты ощущали, как «душевную (чаще – загрудинную, эпигастральную) боль». Была характерна суточная ритмика аффекта в виде отчетливого ухудшения состояния в утренние и улучшения в вечерние часы. Многие пациенты жаловались на нарушение способности к логическому мышлению, установлению последовательных связей между событиями, усвоению элементарного смысла вещей.

По усредненным данным всей группы пациентов с депрессией видно, что разница восстанавливается именно в поздних компонентах вызванных потенциалов.

Наши результаты, представленные на рисунке 2 и на рисунке 3, хорошо согласуются с данными других исследователей. Из последних работ необходимо отметить данные, которые демонстрируют важность учета поздних волн когнитивных вызванных потенциалов, отражающих семантический дефицит у пациентов с психическими заболеваниями (Siddiqui, et al., 2021). Наши исследования наглядно показывают, что этот дефицит обратим. Когнитивный тренинг на совершенно другие задачи эффективно восстанавливает различия в вызванных потенциалах. Это восстановление можно проследить на примере появления различий поздних компонентов когнитивных вызванных потенциалов на изображения объектов живой и неживой природы (Муравьева и др., 2020), присущие здоровым испытуемым (Моисеенко и др., 2015, 2016). Эти объективные показатели проводимой нами реабилитации, дополняют субъективные ощущения улучшения самочувствия.

В связи с тем, что работа вентральной и дорсальной нейронных сетей «переплетается», определить точную локализацию нейронной сети, являющуюся источником интересующих нас изменений по локализации электродов, с которых регистрируются вызванные потенциалы, затруднительно. Более интересны временные характеристики основных волн компонентов вызванных потенциалов. Однако и здесь нас ждут сюрпризы. В частности, поздние компоненты демонстрируют различие, например, при предъявлении изображений объектов живой и неживой природы. Хотя сам процесс их узнавания обычно происходит на 100-150 мс раньше. Это может быть отражением сигнала обратной связи, процесса принятия решений или перепроверки принятого решения.

Когнитивные зрительные вызванные потенциалы в ответ на изображения одушевленных и неодушевленных предметов у пациентов с различными психическими расстройствами до обучения идентичны. Обучение делает их разными на компонентах с задержкой 250-400 мс, такими, как у здоровых испытуемых. Этот результат наглядно демонстрирует эффект тренировки. Осознанное и неосознанное различие изображений объектов живой и неживой природы, вероятно, отражает процессы восстановления вентральной зрительной нейронной сети. Эти поздние компоненты когнитивных вызванных потенциалов можно видеть во всех отведениях. Вентральная нейронная зрительная сеть обеспечивает различие важности наблюдаемого объекта для наблюдателя. Испытуемые различают смысловое значение изображений. Значимые различия появляются в отношении амплитуд компонентов после двухнедельного курса тренинга. Стимуляция зрительных каналов осознанного и неосознанного восприятия может осуществляться различным образом. Как мы говорили выше, физическая активность человека увеличивает уровень гормонов, эндорфинов и уровень мозгового нейротрофического фактора (BDNF), очень важного для роста нейронов и дифференцировки новых синапсов в центральной нервной системе во всех областях мозга, связанных с

обучением, памятью и мышлением. Этот фактор важен для долговременной памяти (Bekinschtein et al., 2008). BDNF экспрессируется во многих частях человеческого тела – от головного мозга до скелетных мышц (Denham et al., 2014). Физические упражнения повышают его уровень в крови пациентов (Mandel et al., 2009; Delezie, Handschin, 2018). Эти измерения важны для выявления как мозговых нарушений, так и прогнозирования восстановления функций мозга.

Заключение

Таким образом, разработан метод реабилитации пациентов, сочетающий использование виртуальной среды и ее контекста, как целеобразующего фактора, синхронизированного с двигательной нагрузкой (движущаяся беговая дорожка или велотренажер), то есть с движением пациента в виртуальной среде. Этот метод вырабатывает у испытуемого новую оздоровительную цель благодаря условно-рефлекторному подкреплению. В виртуальной среде создаются ситуации, требующие от пациента принятия решений о выходе из них с максимальной концентрацией внимания на достижении цели. Происходит реабилитация пациентов с нейрокогнитивными расстройствами путем реструктуризации нервных сетей принятия решений за счет ввода управляющих сигналов при полосовой стимуляции временных и пространственно-частотных каналов зрительной системы, обеспечивающих восстановление когнитивных функций. В основу предлагаемого тренинга заложены такие функции зрительной системы, как оценка вероятности оптимального выбора направления движения, оценка вероятности опасности или правильности выбора цели. Эти основные функции целенаправленной деятельности обеспечивают дорсальные и вентральные зрительные нейронные сети. Их работа происходит на осознанном и неосознанном уровне и описывается нами при помощи двух известных алгоритмов, обеспечивающих императивный и декларативный тип деятельности. Управление и перестройка этих алгоритмов возможна в

процессе тренинга, в условиях осознанного и неосознанного восприятия. В процессе тренинга мы переключаем по каналам зрительной системы, передающих осознанную и неосознанную информацию, внимание пациента от проблем, связанных с болезнью, на другие цели, которые формируем в виртуальной среде (Шелепин и др., 2016; Шелепин, 2017; Shelepin et al., 2020, 2021). Наша реабилитационная технология, названная нами «i-Pavlovian Cognitive Training», является примером эффективной конвергенции человека и искусственного интеллекта, направленного на восстановление когнитивных, эмоциональных (аффективных) и волевых (конативных) процессов, и предназначена для лечения и реабилитации нейродегенеративных заболеваний самого различного генеза и повышения стрессоустойчивости. Технология предназначена для диагностики и реабилитации пациентов с когнитивными нарушениями, возникающими при распространенных заболеваниях: согласно 10-й редакции (МКБ-10) Международной статистической классификации болезней и проблем, связанных со здоровьем, таких как цереброваскулярные заболевания (МКБ-10 I60-I69), психические расстройства (F00-F99), в том числе, легкие когнитивные расстройства (F06.7). Регулярно проводимый электрофизиологический и психофизический мониторинг состояния пациента демонстрирует эффективность «когнитивного тренинга» с использованием метода «i-Pavlovian Cognitive Training».

Список использованных источников

- Бабкин Б.П. Опыт систематического изучения сложно-рефлекторных [психических] явлений у собаки. Диссертация, защищенная в Императорской Военно-медицинской академии. СПб., 1904.
- Глезер В.Д. Зрение и мышление. Л., Наука, 1985.
- Моисеенко Г.А., Шелепин Ю.Е., Хараузов А.К., Пронин С.В., Чихман В.Н., Вахрамеева О.А. Классификация и распознавание изображений живой и неживой природы // Оптический журнал, 2015. Т. 82. № 10. С. 53-64.

- Муравьева С.В., Пронина М.В., Моисеенко Г.А., Пневская А.Н., Поляков Ю.И., Кропотов Ю.Д., Пронин С.В., Шелепин Е.Ю., Шелепин Ю.Е. Исследование зрительных когнитивных нарушений при шизофрении на ранних стадиях заболевания и их коррекция при помощи интерактивных виртуальных сред // Физиология человека, 2017. Т. 43. № 6. С. 24-36.
- Муравьева С.В., Пронин С.В., Толстова Е.А., Шелепин Ю.Е. Особенности влияния экрана большого углового размера на оптимизацию целенаправленной деятельности наблюдателя в условиях интерактивной виртуальной среды // Оптический журнал, 2018. Т. 85. № 8. С. 54.
- Муравьева С.В., Пронин С.В., Чомский А.Н. Использование систем виртуальной реальности для стимуляции работы зрительной системы пациентов, страдающих депрессией // Оптический журнал, 2019. Т. 86(11). С. 72-78.
- Муравьева С.В., Моисеенко Г.А., Чомский А.Н., Шарыбин Е.А., Кропотов Ю.Д. Стимуляция работы зрительной системы с помощью когнитивной задачи в условиях виртуальной среды у пациентов с шизофренией и депрессией // Физиология человека, 2020. Т. 46. № 5. С. 27-36.
- Муравьева С.В., Козуб К.Е., Пронин С.В. Оптические и электрофизиологические методы оценки функционального состояния нейронных сетей зрительной системы // Оптический журнал, 2021, Т. 88. № 12. С. 42-49.
- Муравьева С.В., Шелепин Ю.Е. Восстановление нарушений целенаправленной деятельности у пациентов с психоневрологической патологией путем погружения в интерактивную виртуальную среду // Нейротехнологии / Под ред. Ю.Е. Шелепина, В.Н. Чихмана. СПб., Изд-во ВВМ, 2018. С. 368-384.
- Павлов И.П. Двадцатилетний опыт объективного изучения высшей нервной деятельности (поведения) животных. М. - ПГ., Госиздат, 1923; М., Наука, 1973. С. 214-218.
- Поляков Е.Л., Ячменева Е.Ю. Электрическая стимуляция вознаграждающих систем мозга. Л., 1981.
- Скворцова В.И., Иванова Г.Е., Скворцов Д.В. Способ реабилитации больных в острой стадии инсульта с использованием биологической обратной связи и виртуальной реальности. Патент РФ, RU2432 971 С1. Приоритет: 02.04.2010.
- Шелепин Ю.Е., Чихман В.Н. Нейрофизиология зрения и нейротехнологии целенаправленного поведения // Нейротехнологии / Под ред. Ю.Е. Шелепина, В.Н. Чихмана. СПб., Изд-во ВВМ, 2018. С. 133-164.
- Шелепин Е.Ю., Шелепин Ю.Е., Муравьева С.В., Якимова Е.Г. Нейротехнологии управления деятельностью человека в условиях виртуальной среды // Нейротехнологии / Под ред. Ю.Е. Шелепина, В.Н. Чихмана. СПб., Изд-во ВВМ, 2018. С. 349-367.
- Шелепин Ю.Е., Муравьева С.В., Шелепин Е.Ю., Якимова Е.Г., Шелепин К.Ю. Способ реабилитации пациентов с использованием виртуальной среды. Патент RU(11) 2 654 767 (13) С1. Дата начала действия патента: 02.12.2016.
- Bekinschtein P., Cammarota M., Katze C., Slipczuk L., Rossato J.I., Goldin A., Izquierdo I., Medina J.H. (February 2008). BDNF is essential to promote persistence of long-term memory storage // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008. Vol. 105(7). Pp. 2711-2716. doi: 10.1073/pnas.0711863105.

- Berridge K.C., Kringelbach M.L. Pleasure systems in the brain // *Neuron*, 2015. Vol. 86(3). Pp. 646-664. doi: 10.1016/j.neuron.2015.02.018.
- Casey R., Pelah A., Cameron J., Lasenby J. Symposium On Applied Perception in Graphics and Visualization, 2010. P. 160. doi: 10.1145/1836248.1836282.
- Chawla S., Foreman N. Forms of Interaction in Virtual Space: Applications to Psychotherapy and Counselling // *Source DBLP, Conference: Universal Access in Human-Computer Interaction. 6th International Conference, UAHCI 366, 011, Orlando, FL, USA, 2011. Proceedings, Part IV*. doi: 10.1007/978-3-642-21657-2_33.
- Delezie J., Handschin C. Endocrine Crosstalk Between Skeletal Muscle and the Brain // *Frontiers in Neurology*, 2018. Vol. 9. P. 698. doi: 10.3389/fneur.2018.00698.
- Denham J., Marques F.Z., O'Brien B.J., Charchar F.J. Exercise: putting action into our epigenome // *Sports Medicine*, 2014. Vol. 44(2). Pp. 189-209. doi: 10.1007/s40279-013-0114-1.
- Durgin F.H., Pelah A. Visuomotor adaptation without vision? // *Experimental Brain Research*, 1999. Vol. 127. Pp. 12-18. doi: 10.1007/s002210050769.
- Foreman N., Sandamas G., Newson D. Distance underestimation in virtual space is sensitive to gender but not activity-passivity or mode of interaction // *CyberPsychology & Behavior*, 2004. Vol. 7(4). Pp. 451-457. doi: 10.1089/cpb.2004.7.451.
- Hebb D. *The Organization of Behaviour*. John Wiley & Sons, 1949.
- Jahn F.S., Skovbye M., Obenhausen K., Jespersen A.E., Miskowiak K.W. Cognitive training with fully immersive virtual reality in patients with neurological and psychiatric disorders: A systematic review of randomized controlled trials // *Psychiatry Research*, 2021. Vol. 300. doi: 10.1016/j.psychres.2021.113928.
- Klimova B., Pikhart M., Cierniak-Emerych A., Dziuba S., Firlej K. A Comparative Psycholinguistic Study on the Subjective Feelings of Well-Being Outcomes of Foreign Language Learning in Older Adults From the Czech Republic and Poland // *Frontiers in Psychology*, 2021. Vol. 12.
- Korallo L., Foreman N., Boyd S., Moar M., Coulson M. Can multiple «spatial» virtual timelines convey the relatedness of chronological knowledge across parallel domains? // *Computers & Education*, 2012. Vol. 58(2). Pp. 856–862. doi: 10.1016/j.compedu.2011.10.011.
- Lalor E.C., De Sanctis P., Krakowski M.I., Foxe J.J. Visual sensory processing deficits in schizophrenia: Is there anything to the magnocellular account? // *Schizophrenia Research*, 2012. Vol. 139. P. 24.
- Mandel A.L., Ozdener H., Utermohlen V. Identification of pro- and mature brain-derived neurotrophic factor in human saliva // *Archives of Oral Biology*, 2009. Vol. 54(7). Pp. 689-695. doi: 10.1016/j.archoralbio.2009.04.005.
- Nanapragasam A., Pelah A., Cameron J., Lasenby J. Visualizations for locomotor learning with real time feedback in VR // *Symposium On Applied Perception in Graphics and Visualization. Proceedings*, 2009. Vol. 139. doi: 10.1145/1620993.1621033.
- Pelah A., Thurrell A.E. Reduction of perceived visual speed during locomotion: Evidence for quadrupedal perceptual pathways in human? // *Journal of Vision*, 2001. Vol. 1. Is. 3. P. 307. doi: 10.1167/1.3.307.
- Pelah A., Thurrell A.E., Berry M. Reduction of perceived visual speed during walking: Evidence against the involvement of attentional or vestibular mechanisms // *Journal of Vision*, 2002. Vol. 2. P. 630. doi: 10.1167/2.7.630.

- Pelah A., Barbur J., Thurrell A., Hock H.S. The coupling of vision with locomotion in cortical blindness // *Vision Research*, 2015. Vol. 110. Pp. 286-294. doi: 10.1016/j.visres.2014.04.015.
- Pyles N., Stanziano S.M. Interactive fitness equipment, Applicant(s): [US] EPIX INC; WO0112269 (A1)–2001–02–22; Classification A63B21/00; A63B24/00; Priority number(s): US19990374324 19990813. Also published as: WO0112269 (A9), AU7139700 (A), US2002055418 (A1).
- Sandamas G., Foreman N. Active Versus Passive Acquisition of Spatial Knowledge While Controlling a Vehicle in a Virtual Urban Space in Drivers and Non-Drivers // *SAGE Open*, 2015. Vol. 5. Pp. 1-9. doi: 10.1177/2158244015595443.
- Siddiqui S.V., Nizamie S.H., Siddiqui M.A., Jahan M., Garg S., Tikka S.K., Shreekantiah U. Evaluation of N-400 Evoked Response Potential in Schizophrenia: An endophenotype or a disease marker? // *Psychiatry Research*, 2021. Vol. 300. doi: 10.1016/j.psychres.2021.113907.
- Shelepin Yu.E., Kharauzov A.K., Zhukova O.V., Pronin S.V., Kupriyanov M.S., Tsvetkov O.V. Masking and detection of hidden signals in dynamic images // *Journal of Optical Technology*, 2020. Vol. 87. No. 10. Pp. 624-632.
- Shelepin Y.E., Harauzov A.K., Vakhrameeva O.A., Zhukova O.V., Pronin S.V., Tsvetkov O.V., Skuratova K.A., Shelepin E.Y. Unconscious visual signals and involuntary human reactions // *Integrative Physiology*, 2021. Vol. 2. No. 4.
- Skuratova K.A., Shelepin E.Yu., Yarovaya N.P. Optical search and visual skill // *Journal Optical Technology*, 2021. Vol. 88. No. 12.
- Wilson P., Foreman N. Transfer of information from virtual to real space: Implications for people with physical disability // *Eurographics Technical Report Series*, 1993. Pp.21-25.

References

- Babkin B.P. Opyt sistematicheskogo izucheniia slozhno-reflektornykh [psikhicheskikh] iavlenii u sobaki [The experience of a systematic study of complex reflective [mental] phenomena in a dog]. Dissertatsiia, zashchishchennaia v Imperatorskoi Voenno-meditsinskoi akademii. St. Petersburg, 1904. (In Russian)
- Glezer V.D. Zrenie i myshlenie [Vision and mind: Modeling mental functions]. L., Nauka, 1985.
- Moiseenko G.A., Shelepin Yu.E., Kharauzov A.K., Pronin S.V., Chikhman V.N., Vakhrameeva O.A. Klassifikatsiia i raspoznavanie izobrazhenii zhivoi i nezivoi prirody [Classification and recognition of images of animate and inanimate objects] // *Opticheskii zhurnal*, 2015. Vol. 82. No. 10. Pp. 53-64. (In Russian)
- Murav'eva S.V., Pronina M.V., Moiseenko G.A., Pnevskaiia A.N., Poliakov Iu.I., Kropotov Iu.D., Pronin S.V., Shelepin E.Yu., Shelepin Yu.E. Issledovanie zritel'nykh kognitivnykh narushenii pri shizofrenii na rannikh stadiakh zabolevaniia i ikh korrektsiia pri pomoshchi interaktivnykh virtual'nykh sred [Analysis of visual cognitive impairments in schizophrenia at the early stages of the disease and their correction by Interactive virtual environment] // *Fiziologiya cheloveka*, 2017. Vol. 43. No. 6. Pp. 24-36. (In Russian)
- Murav'eva S.V., Pronin S.V., Tolstova E.A., Shelepin Yu.E. Osobennosti vliianiia ekrana bol'shogo uglovogo razmera na optimizatsiiu tselenapravlennoi deiatel'nosti nabliudatel'ia v

- usloviakh interaktivnoi virtual'noi sredy [Features of the influence of a large angular size screen on the optimization of task-oriented activities of an observer in an interactive virtual environment] // Opticheskii zhurnal, 2018. Vol. 85. No. 8. P. 54. (In Russian)
- Murav'eva S.V., Pronin S.V., Chomskii A.N. Ispol'zovanie sistem virtual'noi real'nosti dlia stimulatsii raboty zritel'noi sistemy patsientov, stradaushchikh depressiei [Using virtual reality systems to stimulate the visual system of patients with depression] // Opticheskii zhurnal, 2019. Vol. 86(11). Pp. 72-78. (In Russian)
- Murav'eva S.V., Moiseenko G.A., Chomskii A.N., Sharybin E.A., Kropotov Iu.D. Stimulatsiia raboty zritel'noi sistemy s pomoshch'iu kognitivnoi zadachi v usloviakh virtual'noi sredy u patsientov s shizofreniei i depressiei [Stimulation of the visual system using a cognitive task in a virtual environment in patients with schizophrenia and depression] // Fiziologiya cheloveka, 2020. Vol. 46. No. 5. Pp. 27-36. (In Russian)
- Murav'eva S.V., Kozub K.E., Pronin S.V. Opticheskie i elektrofiziologicheskie metody otsenki funktsional'nogo sostoianiia neironnykh setei zritel'noi sistemy [Optical and electrophysiological techniques for functional assessment of vision system neuronal networks] // Opticheskii zhurnal, 2021, Vol. 88. No. 12. Pp. 42-49. (In Russian)
- Murav'eva S.V., Shelepin Yu. E. Vosstanovlenie narushenii tselenapravlennoi deiatel'nosti u patsientov s psikhonevrologicheskoi patologiei putem pogruzheniia v interaktivnuiu virtual'nuiu sredu [Restoration of violations of purposeful activity in patients with neuropsychiatric pathology by immersion in an interactive virtual environment] // Neirotekhnologii / Pod red. Yu.E. Shelepina, V.N. Chikhmana. St. Petersburg, VVM Publ., 2018. Pp. 368-384. (In Russian)
- Pavlov I.P. Dvadsatiletnii opyt ob"ektivnogo izucheniia vysshei nervnoi deiatel'nosti (povedeniia) zhivotnykh [Twenty years of experience in the objective study of the higher nervous activity (behavior) of animals]. Moscow-Petrograd., Gosizdat Publ., 1923; Moscow, Nauka Publ., 1973. Pp. 214-218. (In Russian)
- Poliakov E.L., Iachmeneva E.Iu. Elektricheskaiia stimulatsiia voznagrazhdaiushchikh sistem mozga [Electrical stimulation of the rewarding systems of the brain]. Leningrad, 1981. (In Russian)
- Skvortsova V.I., Ivanova G.E., Skvortsov D.V. Sposob reabilitatsii bol'nykh v ostroi stadii insul'ta s ispol'zovaniem biologicheskoi obratnoi svyazi i virtual'noi real'nosti [A method for the rehabilitation of patients in the acute stage of stroke using biofeedback and virtual reality]. Patent RF, RU2432 971 C1. Prioritet: 02.04.2010. (In Russian)
- Shelepin Yu. E., Chikhman V. N. Neurofiziologiya zreniia i neirotekhnologii tselenapravlenno go povedeniia [Neurophysiology of Vision and Neurotechnologies of Purposeful Behavior] // Neirotekhnologii / Pod red. Yu.E. Shelepina, V.N. Chikhmana. St. Petersburg, VVM Publ., 2018. Pp. 133-164. (In Russian)
- Shelepin E.Yu., Shelepin Yu.E., Murav'eva S.V., Iakimova E.G. Neirotekhnologii upravleniia deiatel'nost'iu cheloveka v usloviakh virtual'noi sredy [Neurotechnologies of human activity management in a virtual environment] // Neirotekhnologii / Pod red. Yu.E. Shelepina, V.N. Chikhmana. St. Petersburg, VVM Publ., 2018. Pp. 349-367. (In Russian)
- Shelepin Yu.E., Murav'eva S.V., Shelepin E.Yu., Iakimova E.G., Shelepin K.Yu. Sposob reabilitatsii patsientov s ispol'zovaniem virtual'noi sredy [A method of patient

- rehabilitation using a virtual environment]. Patent RU(11) 2 654 767 (13) S1. Data nachala deistviia patenta: 02.12.2016. (In Russian)
- Bekinschtein P., Cammarota M., Katze C., Slipczuk L., Rossato J.I., Goldin A., Izquierdo I., Medina J.H. (February 2008). BDNF is essential to promote persistence of long-term memory storage // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008. Vol. 105(7). Pp. 2711-2716. doi: 10.1073/pnas.0711863105.
- Berridge K.C., Kringelbach M.L. Pleasure systems in the brain // *Neuron*, 2015. Vol. 86(3). Pp. 646-664. doi: 10.1016/j.neuron.2015.02.018.
- Casey R., Pelah A., Cameron J., Lasenby J. Symposium On Applied Perception in Graphics and Visualization, 2010. P. 160. doi: 10.1145/1836248.1836282.
- Chawla S., Foreman N. Forms of Interaction in Virtual Space: Applications to Psychotherapy and Counselling // *Source DBLP, Conference: Universal Access in Human-Computer Interaction. 6th International Conference, UAHCI 366, 011, Orlando, FL, USA, 2011. Proceedings, Part IV*. doi: 10.1007/978-3-642-21657-2_33.
- Delezie J., Handschin C. Endocrine Crosstalk Between Skeletal Muscle and the Brain // *Frontiers in Neurology*, 2018. Vol. 9. P. 698. doi: 10.3389/fneur.2018.00698.
- Denham J., Marques F.Z., O'Brien B.J., Charchar F.J. Exercise: putting action into our epigenome // *Sports Medicine*, 2014. Vol. 44(2). Pp. 189-209. doi: 10.1007/s40279-013-0114-1.
- Durgin F.H., Pelah A. Visuomotor adaptation without vision? // *Experimental Brain Research*, 1999. Vol. 127. Pp. 12-18. doi: 10.1007/s002210050769.
- Foreman N., Sandamas G., Newson D. Distance underestimation in virtual space is sensitive to gender but not activity-passivity or mode of interaction // *CyberPsychology & Behavior*, 2004. Vol. 7(4). Pp. 451-457. doi: 10.1089/cpb.2004.7.451.
- Hebb D. *The Organization of Behaviour*. John Wiley & Sons, 1949.
- Jahn F.S., Skovbye M., Obenhausen K., Jespersen A.E., Miskowiak K.W. Cognitive training with fully immersive virtual reality in patients with neurological and psychiatric disorders: A systematic review of randomized controlled trials // *Psychiatry Research*, 2021. Vol. 300. doi: 10.1016/j.psychres.2021.113928.
- Klimova B., Pikhart M., Cierniak-Emerych A., Dziuba S., Firlej K. A Comparative Psycholinguistic Study on the Subjective Feelings of Well-Being Outcomes of Foreign Language Learning in Older Adults From the Czech Republic and Poland // *Frontiers in Psychology*, 2021. Vol. 12.
- Korallo L., Foreman N., Boyd S., Moar M., Coulson M. Can multiple «spatial» virtual timelines convey the relatedness of chronological knowledge across parallel domains? // *Computers & Education*, 2012. Vol. 58(2). Pp. 856–862. doi: 10.1016/j.compedu.2011.10.011.
- Lalor E.C., De Sanctis P., Krakowski M.I., Foxe J.J. Visual sensory processing deficits in schizophrenia: Is there anything to the magnocellular account? // *Schizophrenia Research*, 2012. Vol. 139. P. 24.
- Mandel A.L., Ozdener H., Utermohlen V. Identification of pro- and mature brain-derived neurotrophic factor in human saliva // *Archives of Oral Biology*, 2009. Vol. 54(7). Pp. 689-695. doi: 10.1016/j.archoralbio.2009.04.005.
- Nanapragasam A., Pelah A., Cameron J., Lasenby J. Visualizations for locomotor learning with real time feedback in VR // *Symposium On Applied Perception in Graphics and Visualization. Proceedings*, 2009. Vol. 139. doi: 10.1145/1620993.1621033.

- Pelah A., Thurrell A.E. Reduction of perceived visual speed during locomotion: Evidence for quadrupedal perceptual pathways in human? // *Journal of Vision*, 2001. Vol. 1. Is. 3. P. 307. doi: 10.1167/1.3.307.
- Pelah A., Thurrell A.E., Berry M. Reduction of perceived visual speed during walking: Evidence against the involvement of attentional or vestibular mechanisms // *Journal of Vision*, 2002. Vol. 2. Is. 7. P. 630. doi: 10.1167/2.7.630.
- Pelah A., Barbur J., Thurrell A., Hock H.S. The coupling of vision with locomotion in cortical blindness // *Vision Research*, 2015. Vol. 110. Pp. 286-294. doi: 10.1016/j.visres.2014.04.015.
- Pyles N., Stanziano S.M. Interactive fitness equipment, Applicant(s): [US] EPIX INC; WO0112269 (A1)–2001–02–22; Classification A63B21/00; A63B24/00; Priority number(s): US19990374324 19990813. Also published as: WO0112269 (A9), AU7139700 (A), US2002055418 (A1).
- Sandamas G., Foreman N. Active Versus Passive Acquisition of Spatial Knowledge While Controlling a Vehicle in a Virtual Urban Space in Drivers and Non-Drivers // *SAGE Open*, 2015. Vol. 5. Pp. 1-9. doi: 10.1177/2158244015595443.
- Siddiqui S.V., Nizamie S.H., Siddiqui M.A., Jahan M., Garg S., Tikka S.K., Shreekanthiah U. Evaluation of N-400 Evoked Response Potential in Schizophrenia: An endophenotype or a disease marker? // *Psychiatry Research*, 2021. Vol. 300. doi: 10.1016/j.psychres.2021.113907.
- Shelepin Yu.E., Kharauzov A.K., Zhukova O.V., Pronin S.V., Kupriyanov M.S., Tsvetkov O.V. Masking and detection of hidden signals in dynamic images // *Journal of Optical Technology*, 2020. Vol. 87. No. 10. Pp. 624-632.
- Shelepin Y.E., Harauzov A.K., Vakhrameeva O.A., Zhukova O.V., Pronin S.V., Tsvetkov O.V., Skuratova K.A., Shelepin E.Y. Unconscious visual signals and involuntary human reactions // *Integrative Physiology*, 2021. Vol. 2. No. 4.
- Skuratova K.A., Shelepin E.Yu., Yarovaya N.P. Optical search and visual skill // *Journal Optical Technology*, 2021. Vol. 88. No. 12.
- Wilson P., Foreman N. Transfer of information from virtual to real space: Implications for people with physical disability // *Eurographics Technical Report Series*, 1993. Pp.21-25.