



Нейротехнологии как фактор трансформации образовательного процесса

Л. Д. Александрова¹, Р. А. Богачева², Т. А. Чекалина¹,
М. В. Максимова¹, В. И. Тимонина¹

¹ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия

² ООО «Нейророботикс», Москва, Россия

Для цитирования	Александрова Л. Д., Богачева Р. А., Чекалина Т. А., Максимова М. В., Тимонина В. И. Нейротехнологии как фактор трансформации образовательного процесса // Профессиональное образование и рынок труда. 2021. № 4. С. 98–113. https://doi.org/10.52944/PORT.2021.47.4.007
For citation:	Aleksandrova, L. D., Bogacheva, R. A., Chekalina, T. A., Maximova, M. V., & Timonina, V. I. (2021). Neurotechnology as the basis for the educational process transformation. <i>Vocational Education and Labour Market</i> , 4, 98–113. https://doi.org/10.52944/PORT.2021.47.4.007
Поступила / Received	19 октября 2021 г. / October 19, 2021
Copyright	© Александрова Л. Д., Богачева Р. А., Чекалина Т. А., Максимова М. В., Тимонина В. И., 2021

Александрова Людмила Дмитриевна — кандидат философских наук, доцент, заместитель директора Института онлайн-образования, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, ORCID: 0000-0002-4896-9959, e-mail: LDAleksandrova@fa.ru

Богачева Раиса Александровна — руководитель образовательных программ, проектный менеджер ООО «Нейророботикс», ORCID: 0000-0002-6322-1180, e-mail: r.bogacheva@neurobotics.ru

Чекалина Татьяна Александровна — кандидат педагогических наук, доцент, заведующая Лабораторией онлайн-обучения и анализа данных в образовании Института онлайн-образования, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, ORCID: 0000-0002-2179-0326, e-mail: tachekalina@fa.ru

Максимова Мария Васильевна — главный специалист Лаборатории онлайн-обучения и анализа данных в образовании Института онлайн-образования, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, ORCID: 0000-0003-3228-2850, e-mail: mvmaksimova@fa.ru

Тимонина Виктория Ивановна — главный специалист Лаборатории онлайн-обучения и анализа данных в образовании Института онлайн-образования,

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, ORCID: 0000-0003-2344-6497, e-mail: vitimonina@fa.ru

Аннотация. Изучение возможностей мозга для повышения качества обучения находится в центре внимания педагогической науки уже много лет. Развитие цифровизации позволило использовать в исследованиях специальное оборудование, с помощью которого можно оценивать и контролировать работу мозга, развивать умственные способности, познавательные функции и т. п. Нейротехнологии стали эффективным средством, позволяющим трансформировать образовательный процесс за счет подбора специального учебного контента с учетом индивидуальных особенностей обучающихся. Вместе с тем возникает необходимость в конкретизации терминологии и определении актуальных направлений исследований в данной области. Цель статьи — попытка восполнить этот пробел с помощью репрезентативного анализа публикаций, посвященных нейротехнологиям, а также сущности нейрообразования. Практическая ценность исследования состоит в апробации возможностей нейротехнологий для повышения вовлеченности обучающихся в учебный процесс. Используя формат хакатона, авторы статьи привлекли студентов к разработке нейроигры, нацеленной на тренировку навыков самоконтроля, развитие концентрации и «спокойствия» под нейрогарнитуру, которая, помимо измерения параметров, позволяет управлять игрой при помощи биологической обратной связи. Данный успешный кейс по вовлечению студентов в мир нейротехнологий может быть реализован в других вузах, а также на предприятиях партнеров-работодателей.

Ключевые слова: нейронауки, нейрообразование, нейротехнологии, онлайн-образование, нейроигры, хакатон, профессиональное образование

Neurotechnology as a factor of the educational process transformation

L. D. Aleksandrova¹, R. A. Bogacheva², T. A. Chekalina¹,
M. V. Maximova¹, V. I. Timonina¹

¹ Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

² Neurobotics LLP, Moscow, Russian Federation

Ludmila D. Aleksandrova — Candidate of Science (Philosophy), Associate Professor, Deputy Director of the Institute of Online Education, Financial University under the Government of the Russian Federation, ORCID: 0000-0002-4896-9959, e-mail: ldaleksandrova@fa.ru

Raisa A. Bogacheva — Head of Educational Programs, Project Manager of Neurobotics LLP, ORCID: 0000-0002-6322-1180, e-mail: r.bogacheva@neurobotics.ru

Tatyana A. Chekalina — Candidate of Science (Pedagogy), Associate Professor, Head of the Laboratory of Online Learning and Data Analysis in Education of the Institute of Online Education, Financial University under the Government of the Russian Federation, ORCID: 0000-0002-2179-0326, e-mail: tachekalina@fa.ru

Maria V. Maximova — Chief Specialist of the Laboratory of Online Learning and Data Analysis in Education of the Institute of Online Education, Financial University under the Government of the Russian Federation, ORCID: 0000-0003-3228-2850, e-mail: mvmaksimova@fa.ru

Victoria I. Timonina — Chief Specialist of the Laboratory of Online Learning and Data Analysis in Education of the Institute of Online Education, Financial University under the Government of the Russian Federation, ORCID: 0000-0003-2344-6497, e-mail: vitimonina@fa.ru

Abstract. For a long time, the study of the brain capabilities for the improvement of the quality of education has been an urgent direction in pedagogical science. Due to the development of digitalization, new areas of research have emerged related to the use of special equipment that makes it possible to assess and control brainwork, develop mental abilities, cognitive functions, etc. One of them is neurotechnology, which is an effective means of transforming the educational process: it offers educational content based on the individual characteristics of students. Thus, a need to concretize the terminology and determine the current research areas arises. The article aims to attempt to fill this gap with the help of a representative analysis of publications on neurotechnologies, as well as the essence of neuroeducation. The practical value of the article lies in testing the possibilities of neurotechnologies to increase the involvement of students in the educational process. Through the hackathon format the authors of the article attracted students to develop neurogames as a tool for training self-control skills like concentration and «calmness» used via a neuroheadset, which, in addition to the measuring function, allows you to control the game using biofeedback. The successful case of inviting students to the world of neurotechnology can be implemented in other universities, as well as the enterprises of partner employers.

Keywords: neuroscience, neuroeducation, neurotechnology, online education, neurogames, hackathon, vocational education

Введение

В настоящее время активно развивается современная информационная инфраструктура организаций высшего образования, повышается квалификация всех субъектов образовательного процесса, совершенствуется электронное обучение и дистанционные образовательные технологии. Как известно, цифровизация образовательной среды направлена на совершенствование качества учебного процесса в соответствии с индивидуальными образовательными запросами обучающихся. Одним из направлений, которое может стать эффективным инструментом решения данных проблем, является нейрообразование.

Нейрообразование возникло на основе возросшего интереса к нейробиологическим исследованиям, которые позволяют объяснить функционирование мозга в процессе обучения и предложить педагогические приемы и методики, совместимые с функциями мозга (Москвин, Москвина, 1997).

В настоящий момент существуют различные подходы к внедрению нейрообразования. Например, Е. Н. Дзятковская выделяет три направления его развития:

- Использование нейробиологии и дифференциальной психологии для решения конкретных практических задач индивидуализации обучения.
- Использование данных когнитивных наук для формулировки фундаментальных принципов обучения в соответствии с законами работы мозга.
- Попытка прямого переноса данных нейробиологических исследований в практику образования (Дзятковская, 2018).

В своей работе мы ориентируемся на первое направление, поскольку индивидуализация обучения является одним из важных требований к организации учебного процесса в цифровой образовательной среде.

В нейрообразовании применяются как педагогические методики и приемы, так и различные нейротехнологии. Наиболее распространенной является электроэнцефалограмма, которая используется не только для мониторинга мозговой активности, но и служит основой нейроигр, применяющихся для тренировки навыков самоконтроля, развития концентрации (бета-тренинга) и «спокойствия» (альфа-тренинга) с помощью биологической обратной связи.

Целью статьи является определение актуальных тенденций в области нейрообразования, а также представление собственного опыта применения нейротехнологий для трансформации образовательного процесса в вузе.

Обзор литературы

Спрос на нейронауки начался во время «Десятилетия мозга» в 1990–2000 гг. (Dekker et al., 2012). Страной-лидером стали США, опубликовавшие с 1996 по 2020 гг. самое большое количество статей по нейронаукам. Заинтересовались нейротехнологиями и другие страны: количество публикаций на эту тему существенно выросло в Великобритании, Китае, Японии и Германии (см. рис. 1).

Несмотря на то, что Россия не занимает лидирующих позиций, нейротехнологии являются стратегическим направлением модернизации экономики и инноваций. Конкурентноспособный российский сегмент рынка Нейронет планируется сформировать к 2035 году.

В России развитие и распространение продуктов и сервисов рынка нейрообразования происходит больше всего в дистанционном обучении, массовых открытых онлайн-курсах, смешанном обучении, а также инновационных моделях дополнительного образования¹. Это дало толчок к разработке образовательных программ и устройств по нейротехнологиям.

Всего выделяют четыре основных вида нейротехнологий: *электроэнцефалограмма (Electroencephalogram)*, *отслеживатель глаз (eye tracking)*, *функциональная магнитно-резонансная томография (fMRI)* и *нейроигрушки (neuro-toys)*.

1. *Электроэнцефалограмма, ЭЭГ (Electroencephalogram)*.

Принцип технологии ЭЭГ — размещение электродов или каналов на голове для измерения потенциала головного мозга (Hames, Baker, 2013).

¹ План мероприятий (дорожная карта) «Нейронет» Национальной технологической инициативы. https://www.nvc.ru/upload/doc/dk_neuronet.pdf

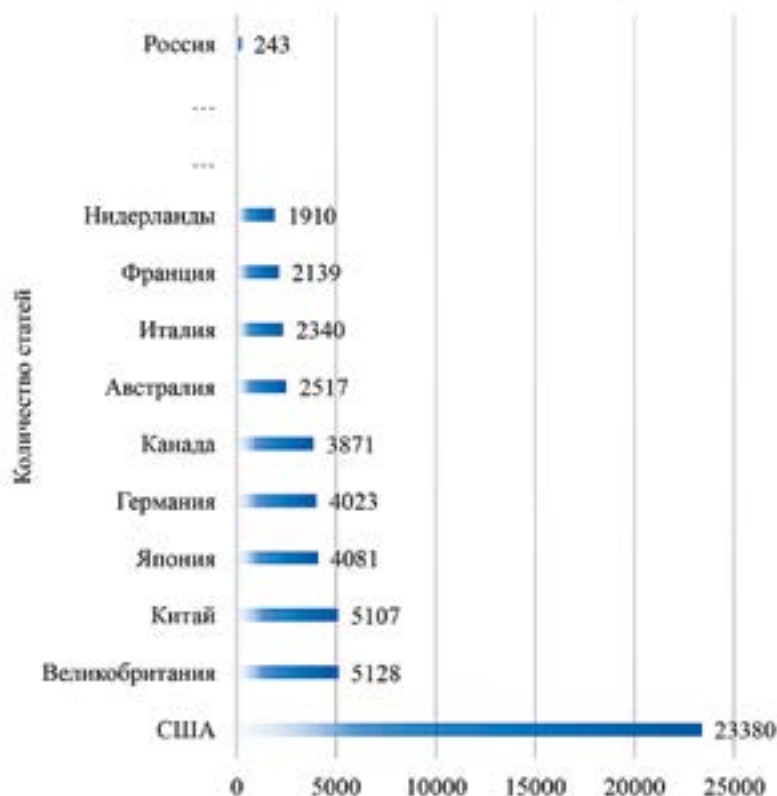


Рисунок 1. Рейтинг стран по количеству статей по нейронаукам в 1996–20201

Они представляют собой «линейную суперпозицию электрических диполей», которые распределены по областям головного мозга. Сигналы ЭЭГ показывают электрическую активность относительно реакции коры головного мозга. Electroды улавливают ЭЭГ-сигналы, которые могут влиять на мозговые волны учащихся во время активности или решения когнитивной задачи. Первый датчик измерения ЭЭГ потребительского уровня «NeuroSky Mindset» вышел в 2007 году. Самыми популярными датчиками ЭЭГ являются NeuroSky, Emotiv, InteraXon и OpenBCI.

С помощью ЭЭГ можно воздействовать на процесс обучения студентов путем повышения вовлеченности и уровня внимания, анализировать эффективность и удовлетворенность учебным процессом, оценивать влияние различных методов обучения, учебных форматов и различных технологий, а также контролировать эмоциональное состояние обучающегося (Stewart, 2015; Chen & Wu, 2015; Sawangjai et al., 2019; Bai et al., 2020; Nandi et al, 2021). В соответствии с направленностью воздействия можно выделить три группы исследований: 1) *эксперименты по измерению уровня внимания*; 2) *исследования времени вовлеченности*; 3) *исследования способности к взаимодействию*.

¹ Составлен по данным SCImago Journal & Country Rank. <https://www.scimagojr.com/countryrank.php?area=2800&category=2806>

Эксперименты по измерению уровня внимания нацелены на изучение эффективности различных методов и форм обучения (Pi et al., 2021). Более того, с помощью ЭЭГ возможно провести анализ и оценку взаимосвязи между вниманием и эмоциями во время просмотра видеолекций (Izquierdo, Garrigues, 2019), влияния тренировки внимания на учащихся с низкими показателями обучения (Martinez, Zhao, 2018), а также влияния температуры в аудитории (Kim et al., 2020) и различного освещения на обучение студентов (Candra et al., 2019).

Исследования времени вовлеченности, основанные на разработанном Ghergulescu & Muntean (2016) сенсорном методе анализа мотивации, позволяют получить информацию об изменении уровня мотивации во время интерактивных занятий (Dikker et al., 2017) и выявляют ситуационный интерес (Babiker et al., 2019) или умственную вовлеченность учащихся в цифровой среде обучения (Khedher et al., 2019). С помощью измерения вовлеченности можно также выявить уровень замешательства обучающихся при предоставлении им тестов и логических игр (Zhou et al., 2019) или эффективность различных методов, таких как, например, адаптивное онлайн-обучение (Eldenfria, Al-Samarraie, 2019).

Исследования способности к взаимодействию (синхронизация «мозг–мозг») проводятся для изучения взаимосвязи между мозговыми волнами множества людей (Dikker et al., 2017; Bevilacqua et al., 2019), например, для изучения социальной динамики взаимодействия между обучающимися и учителем в классе (Bevilacqua et al., 2019). Обе группы исследователей анализировали сигналы ЭЭГ, исходящие от обучающихся и их учителей, отслеживая межмозговую синхронность взаимодействия ученика с группой, ученика с учеником и ученика с учителем. Было обнаружено, что синхронность «мозг–мозг» связана с методами обучения, индивидуальными различиями и социальной динамикой. Другой группе ученых в результате применения метода синхронизации удалось даже предсказать результаты обучения исследуемых (Davidesco et al., 2019).

II. Айттрекинг, или Отслеживатель глаз (Eye tracking)

Айттрекинг определяет ориентацию оптической оси глазного яблока в пространстве движения глаз (Richardson, Spivey, 2004) для измерения времени фиксации взгляда во время чтения или просмотра графического материала (Anderson et al., 2014; Lai et al., 2013). Он обеспечивает как количественный, так и качественный анализ взгляда субъекта, фиксируя данные, связанные с индивидуальным интересом, уровнем внимания и визуальным вниманием во время обучения (Pora, 2015). В исследованиях чаще всего айттрекинг используется наравне с измерениями процесса ЭЭГ, например, для измерения когнитивной нагрузки путем подсчета времени, потраченного на просмотр определенного момента в видеолекции (Makransky et al., 2019). С помощью технологии отслеживания взгляда также измеряют распределение внимания обучающихся в виртуальной реальности (Shavit-Cohen, Zion Golumbic, 2019).

III. Функциональная магнитно-резонансная томография (fMRI)

За последнее десятилетие нейротехнологии позволили серьезно продвинуться в понимании структуры и функций мозга. Например, удалось выяснить, что изучение нового языка включает синтаксическую

обработку, которая проявляется при активации лобных извилин (Weber et al., 2016), а нейронные и поведенческие показатели беглости речи связаны с возрастом и уровнем образования (Fonseca et al., 2021). Существующие исследования с использованием fMRI в области образования сосредоточены на кортикальных системах, которые представляют синтаксические и семантические компоненты человеческого языка (Henderson et al., 2016; Denervaud et al., 2020). Однако следует признать, что fMRI в сфере образования, особенно в условиях онлайн-обучения, остается менее информативной технологией.

IV. Нейроигрушки (neuro-toys).

Развитие нейротехнологий привело к созданию нейроигрушек, которые используются для улучшения повседневных навыков, связанных с отдыхом, сном или вниманием. *Extimate neuro-toys* (сверхнейроигрушки) позволяют управлять нашим внутренним «я» (настроением, уровнем концентрации) и даже осваивать новые способы общения или самовыражения (Brenninkmeijer, Zwart, 2017).

Студенческий хакатон как среда для создания нейроигр

Активное расширение возможностей нейротехнологий в образовании послужило основанием для проведения собственных экспериментов в области нейрообразования.

Институтом онлайн-образования Финансового университета при Правительстве РФ совместно с ГК «Нейроботикс» и ЦМИТ «Нейролаб» (18–21 мая 2021 г.) был организован онлайн-хакатон </be_Neuro>¹ по созданию нейроигр с использованием нейрогарнитуры. В нем приняли участие 23 студента Института онлайн-образования и Колледжа информатики и программирования Финансового университета. Выбор в пользу хакатона был обусловлен тем, что данный формат конкурса позволяет усилить мотивацию участников за счет эффекта соревновательности в условиях ограниченного времени. Помимо того, хакатон предусматривает участие экспертов — представителей реальной индустрии, которые могут дать критическую оценку и практические советы, приближенные к реальному спросу на рынке нейроигр.

Основная цель онлайн-хакатона — знакомство студентов с возможностями нейрогарнитуры и перспективами разработки нейроигр.

На разработку нейроигры участникам было дано три дня, в течение которых проходили онлайн-лекции по нейрофизиологии мозга и психологии, необходимые для создания нейроигр, и онлайн-консультации с экспертами из ГК «Нейроботикс» и ЦМИТ «Нейролаб».

В качестве нейрогарнитуры был выбран ЭЭГ-трекер NeuroPlay 6c (см. рис. 2), разработанный ГК «Нейроботикс», имеющий 6 сухих активных электродов (не требующих использования геля или другой проводящей среды)².

¹ http://www.fa.ru/org/faculty/foo/News/2021-05-24-be_Neuro.aspx

² Электроды NeuroPlay расположены по международной схеме «10–20», собственный шум 3–4 мкВ пик-пик, продолжительность работы в режиме съема данных 24 часа, длительность задержки при передаче сигнала от мозга — до 2-х секунд, передача данных осуществляется по Bluetooth 4.0, вес нейрогарнитуры 100 г., работа в операционной среде Windows 10, Mac IOS, Android, iPhone.

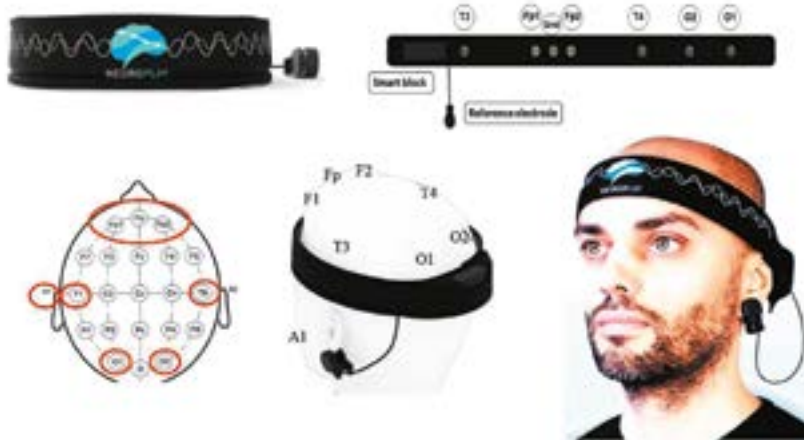


Рисунок 2. Нейрогарнитура NeuroPlay 6с¹

Нейрогарнитура в нейроигре измеряет электроактивность в каждый момент времени и в динамике, позволяет управлять игрой при помощи биологической обратной связи (нейроБОС или нейрофидбек). Биологическая обратная связь позволяет сделать в игре несколько уровней сложности для тренировки глубины вхождения в управляющее состояние, а также скорости вхождения и длительности удержания этого состояния.

По условиям хакатона участникам было необходимо разработать нейроигру как инструмент для тренировки навыков самоконтроля для развития концентрации (бета-тренинг) и «спокойствия» (альфа-тренинг) с помощью ЭЭГ-трекер NeuroPlay (см. рис. 3).

Для тренировки навыков расслабления и концентрации важно, чтобы все элементы воздействия на игрока соответствовали заявленным состояниям.

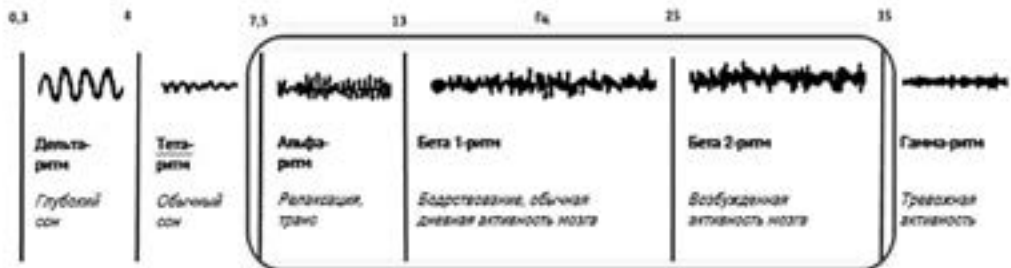


Рисунок 3. Ритмы электроактивности мозга (Гц)

¹ Рисунок с сайта компании «Нейроботикс»: <https://neuroplay.ru/catalog/neuroplay-6c>

Например, чтобы помочь игроку расслабиться, необходимо уменьшить реагирование на события в пространстве игры, также можно использовать такие успокаивающие цвета, как оттенки синего и зеленого, медитативные мелодии и Vol.д. Это особенно важно на первых этапах игры, когда человек еще не сориентировался и, возможно, из-за обилия стресса, ему бывает сложно расслабиться в первый раз. Например, в игре «Расцвет», разработанной ГК «Нейроботикс», необходимо полностью распустить разные виды цветов и сделать это как можно быстрее, удерживая выбранный ритм («альфа» или «бета») на высоком уровне. Длительность тренировки варьируется от 1 до 20 минут (см. рис. 4).



Рисунок 4. Пример интерфейса нейроигры («Расцвет»)¹

Основным критерием оценивания нейроигр было наличие связи с психологической и нейробиологической областями. Другие критерии оценки нейроигр включали: соответствие сути и содержания нейроигры (цвет, звук и др.), степень проработки (сценарий, количество переходов, интуитивно понятный интерфейс и / или инструкция и Vol.п.), отсутствие багов и Vol.д. Дополнительными критериями были наличие подробного описания игры (комментирование кода), качество презентации / защиты проекта и др. Техническая сложность реализации игр могла быть различной и зависеть от уровня знаний и умений участников хакатона. Предпочтительной средой программирования была JavaScript.

В итоге команды-участники разработали четыре различные нейроигры, которые в дальнейшем можно использовать как инструмент для тренировки навыков самоконтроля, для развития концентрации и «спокойствия».

Заключение

Применение нейротехнологий позволяет более качественно организовать образовательный процесс, повысить мотивацию и степень вовлеченности обучающихся в цифровой образовательной среде.

¹ Взято с сайта компании «Нейроботикс»

Нейротехнологии открывают новые возможности для трансформации образования, поскольку позволяют диагностировать уровень когнитивных функций — внимание, память, а также тренировать эти процессы с помощью нейроигр. Современные нейротехнологии облегчают внедрение систем искусственного интеллекта в процесс образования и делают обучение более персонализированным. Это важно, поскольку современный человек стремится повысить свои компетенции и адаптироваться к техносфере.

Опыт проведения онлайн-хакатона показал, что нейрообразование востребовано как обучающимися, так и преподавателями. Студенты, изучая через игровые форматы возможности своего мозга, более ответственно относятся к образовательному процессу, учатся развивать свои когнитивные навыки. У преподавателей появляется возможность выстраивать персонализированное обучение с учетом индивидуальных потребностей студентов, которые они смогут выявить с помощью нейротехнологий.

Дальнейшее применение нейротехнологий в образовании существенно расширит понимание механизмов функционирования мозга и приведет к созданию устройств, повышающих качество обучения благодаря улучшению памяти, восприятия, внимания, развития мышления и самоконтроля. Решение этих задач крайне важно, поскольку развитие индивидуальных особенностей человека влияет на улучшение социального взаимодействия, коммуникацию, продуктивную деятельность. В будущем нейротехнологии и нейроигры могут стать инструментами симбиоза человека и техносферы, достигаемого в процессе образования.

Литература

1. Дзятковская Е. Н. Нейродидактика: мифы и реальность // Методологические ориентиры развития современной научно-дидактической мысли: сб. науч. тр. Всерос. сетевой науч. конф. (21–29 ноября 2018 г.) / Сост. А. А. Мамченко. М.: Институт стратегии развития образования РАО, 2018. С. 78–88.
2. Москвин В. А., Москвина Н. В. Нейропедагогика как новое направление образовательных технологий // Технологии образовательного процесса. Оренбург: Изд-во ОГУ, 1997.
3. Anderson O. R., Love B. C., Tsai M. J. Neuroscience perspectives for science and mathematics learning in technology-enhanced learning environments // International Journal of Science and Mathematics Education. 2014. Vol. 12. No. 3. P. 467–474.
4. Babiker A. et al. EEG in classroom: EMD features to detect situational interest of students during learning // Multimedia Tools and Applications. 2019. Vol. 78. No. 12. P. 16261–16281. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-7016-z>
5. Bai L. et al. Emotional monitoring of learners based on EEG signal recognition // Procedia Computer Science. 2020. Vol. 174. С. 364–368.
6. Bevilacqua D. et al. Brain-to-brain synchrony and learning outcomes vary by student–teacher dynamics: Evidence from a real-world classroom

- electroencephalography study // *Journal of cognitive neuroscience*. 2019. Vol. 31. No. 3. P. 401–411. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01274
7. Brenninkmeijer J., Zwart H. From ‘hard’neuro-tools to ‘soft’neuro-toys? Refocussing the neuro-enhancement debate // *Neuroethics*. 2017. Vol. 10. No. 3. P. 337–348. <https://doi.org/10.1007/s12152-016-9283-6>
8. Candra H., Setyaningsih E, Pragantha J, Chai R. Enhancing student’s learning experience in the classroom using lighting stimulation // *Enhancing Student’s Learning Experience in the Classroom Using Lighting Stimulation*. 2019. Vol. 10. No. 7. P. 292–304. https://www.ijicc.net/images/vol10iss7/10706_Candra_2019_E_R.pdf
9. Chen C.-M., Wu, C.-H. Effects of different video lecture types on sustained attention, emotion, cognitive load, and learning performance // *Computers & Education*. 2015. Vol. 80. P. 108–121.
10. Davidesco I. et al. Brain-to-brain synchrony between students and teachers predicts learning outcomes [Preprint] // *bioRxiv*. 2019. 644047. <https://doi.org/10.1101/644047>
11. Dekker S. et al. Neuromyths in education: Prevalence and predictors of misconceptions among teachers // *Frontiers in psychology*. 2012. Vol. 3. P. 429. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00429>
12. Denervaud, S et al. An fMRI study of error monitoring in Montessori and traditionally-schooled children // *NPJ Science of Learning*. 2020. Vol. 5. No. 11. <https://doi.org/10.1038/s41539-020-0069-6>
13. Dikker S. et al. Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom // *Current biology*. 2017. Vol. 27. No. 9. P. 1375–1380. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.04.002>
14. Eldenfria A., Al-Samarraie H. Towards an online continuous adaptation mechanism (OCAM) for enhanced engagement: An EEG study // *International Journal of Human–Computer Interaction*. 2019. Vol. 35. №. 20. P. 1960–1974. <http://dx.doi.org/10.1080/10447318.2019.1595303>
15. Elmer S., Kühnis J. Functional connectivity in the left dorsal stream facilitates simultaneous language translation: An EEG study // *Frontiers in human neuroscience*. 2016. Vol. 10. No. 60. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00060>
16. Fonseca R. P. et al. The impact of age and education on phonemic and semantic verbal fluency: Behavioral and fMRI correlates [Preprint] // *bioRxiv*. 2021. <https://doi.org/10.1101/2021.01.14.426642>
17. Ghergulescu I., Muntean C.H. ToTCompute: a novel EEG-based TimeOnTask threshold computation mechanism for engagement modelling and monitoring // *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. 2016. Vol. 26. No. 3. P. 821–854. <https://doi.org/10.1007/s40593-016-0111-2>
18. Hames E., Baker, M. EEG-based comparisons of performance on a mental rotation task between learning styles and gender // In *Frontiers in Education Conference*. Oklahoma City: IEEE, 2013. P. 1176–1182. <https://doi.org/10.1109/FIE.2013.6685016>
19. Henderson, J. M., Choi, W., Lowder, M. W., Ferreira, F. Language structure in the brain: A fixation-related fMRI study of syntactic surprisal

in reading. // *NeuroImage*. 2016. Vol. 132. P. 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.02.050>

20. Izquierdo V., Garrigues M.L. Neurocommunicative methodologies: attention and emotion of the audiovisual story in the classroom // *Multidisciplinary Journal for Education, Social and technological sciences*. 2019. Vol. 6. No. 1. P. 89–114. <http://dx.doi.org/10.4995/muse.2019.10670>

21. Khedher A. B. et al. Tracking students' mental engagement using EEG signals during an interaction with a virtual learning environment // *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*. 2019. No. 11. P. 1–14. <http://dx.doi.org/10.4236/jilsa.2019.111001>

22. Kim H. et al. A psychophysiological effect of indoor thermal condition on college students' learning performance through EEG measurement // *Building and Environment*. 2020. Vol. 184. No. 107223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107223>

23. Lai M. L. et al. A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012 // *Educational Research Review*. 2013. Vol. 10. P. 90–115. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2013.10.001>

24. Lalancette H., Campbell S.R. Educational neuroscience: Neuroethical considerations // *International journal of environmental & science education*. 2012. Vol. 7. No. 1. P. 37–52. https://www.researchgate.net/publication/265110383_Educational_neuroscience_Neuroethical_considerations

25. Makransky G., Terkildsen T. S., Mayer R.E. Role of subjective and objective measures of cognitive processing during learning in explaining the spatial contiguity effect // *Learning and Instruction*. 2019. Vol. 61. P. 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2018.12.001>

26. Martinez T., Zhao Y. The impact of mindfulness training on middle grades students' office discipline referrals // *RMLE online*. 2018. Vol. 41. No. 3. P. 1–8. <http://dx.doi.org/10.1080/19404476.2018.1435840>

27. Mollo G., Pulvermüller F., Hauk O. Movement priming of EEG/MEG brain responses for action-words characterizes the link between language and action // *Cortex*. 2016. Vol. 74. P. 262–276. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.10.021>

28. Nandi A. et al. Real-time emotion classification using eeg data stream in e-learning contexts // *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 5. 1589. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.10.021>

29. Pi Z. et al. Learning by explaining to oneself and a peer enhances learners' theta and alpha oscillations while watching video lectures // *British Journal of Educational Technology*. 2021. Vol. 52. No. 2. P. 659–679. <http://dx.doi.org/10.1111/bjet.13048>

30. Popa L. et al. Reading beyond the glance: Eye tracking in neurosciences // *Neurological Sciences*. 2015. Vol. 36. No. 5. P. 683–688. <https://doi.org/10.1007/s10072-015-2076-6>

31. Richardson D. C., Spivey M. J. Eye tracking: Characteristics and methods // *Encyclopedia of biomaterials and biomedical engineering*. 2004. P. 568–572. <http://dx.doi.org/10.1201/b18990-101>

32. Sawangjai P. et al. Consumer grade EEG measuring sensors as research

tools: A review // *IEEE Sensors Journal*. 2019. Vol.20. No. 8. P.3996 — 4024. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2962874>

33. Shavit-Cohen K., Zion Golumbic E. The dynamics of attention shifts among concurrent speech in a naturalistic Multi-speaker virtual environment // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2019. Vol. 13. No. 386. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00386>

34. Shen, L., Wang, M., & Shen, R. Affective e-learning: Using “emotional” data to improve learning in pervasive learning environment // *Journal of Educational Technology & Society*. 2009. Vol. 12. No. 2. P. 176–189. <http://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.12.2.176>

35. Stewart P.C. This is your brain on psychology wireless electroencephalography technology in a university classroom // *Teaching of Psychology*. 2015. Vol. 42. No. 3. P. 234–241. <https://doi.org/10.1177/0098628315587621>

36. Weber K. et al. fMRI syntactic and lexical repetition effects reveal the initial stages of learning a new language // *Journal of neuroscience*. 2016. Vol. 36. No. 26. P. 6872–6880. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3180-15.2016>

37. Zhou Y. et al. Beyond engagement: an EEG-based methodology for assessing user’s confusion in an educational game // *Universal Access in the Information Society*. 2019. Vol. 18. No. 3. P. 551–563. <https://doi.org/10.1007/s10209-019-00678-7>

References

Anderson, O. R., Love, B. C., & Tsai, M. J. (2014). Neuroscience perspectives for science and mathematics learning in technology-enhanced learning environments. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 12 (3), 467–474.

Babiker, A., Faye, I., Mumtaz, W., Malik, A. S., & Sato, H. (2019). EEG in classroom: EMD features to detect situational interest of students during learning. *Multimedia Tools and Applications*, 78(12), 16261–16281. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-7016-z>

Bai, L., Guo, J., Xu, T., & Yang, M. (2020). Emotional Monitoring of Learners Based on EEG Signal Recognition. *Procedia Computer Science*, 174, 364–368.

Bevilacqua, D., Davidesco, I., Wan, L., Chaloner, K., Rowland, J., Ding, M., Poeppel, D., & Dikker, S. (2019). Brain-to-brain synchrony and learning outcomes vary by student–teacher dynamics: Evidence from a real-world classroom electroencephalography study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31(3), 401–411. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01274

Brenninkmeijer, J., & Zwart, H. (2017). From ‘hard’neuro-tools to ‘soft’neuro-toys? Refocussing the neuro-enhancement debate. *Neuroethics*, 10(3), 337–348. <https://doi.org/10.1007/s12152-016-9283-6>

Candra, H., Setyaningsih, E., Pragantha, J., & Chai, R. (2019). Enhancing Student’s Learning Experience in the Classroom Using Lighting Stimulation. *International Journal of Innovation, Creativity and Change*, 10 (7), 292–

304. https://www.ijicc.net/images/vol10iss7/10706_Candra_2019_E_R.pdf
- Chen, C.-M., & Wu, C.-H. (2015). Effects of different video lecture types on sustained attention, emotion, cognitive load, and learning performance. *Computers & Education*, 80, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.08.015>
- Davidesco, I., Laurent, E., Valk, H., West, T., Dikker, S., Milne, C., & Poeppel, D. (2019). Brain-to-brain synchrony between students and teachers predicts learning outcomes. [Preprint]. *bioRxiv*, 644047. <https://doi.org/10.1101/644047>
- Dekker, S., Lee, N. C., Howard-Jones, P., & Jolles, J. (2012). Neuromyths in education: Prevalence and predictors of misconceptions among teachers. *Frontiers in Psychology*, 3, 429. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00429>
- Denervaud, S., Fornari, E., Yang, X.-F., Hagmann, P., Immordino-Yang, M. H., & Sander, D. (2020). An fMRI study of error monitoring in Montessori and traditionally-schooled children. *Npj Science of Learning*, 5 (11). <https://doi.org/10.1038/s41539-020-0069-6>
- Dikker, S., Wan, L., Davidesco, I., Kaggen, L., Oostrik, M., McClintock, J., & Poeppel, D. (2017). Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom. *Current Biology*, 27 (9), 1375–1380. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.04.002>
- Dzyatkovskaya, E. N. (2018). Neurodidactics: myths and reality. In A. A. Mamchenko (Ed.). *Methodological guidelines for the development of modern scientific and didactic thought* (pp. 78–88). Institute of Education Development Strategy of the RAE.
- Eldenfria, A., & Al-Samarraie, H. (2019). Towards an online continuous adaptation mechanism (OCAM) for enhanced engagement: An EEG study. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 35 (20), 1960–1974. <http://dx.doi.org/10.1080/10447318.2019.1595303>
- Elmer, S., & Kühnis, J. (2016). Functional connectivity in the left dorsal stream facilitates simultaneous language translation: An EEG study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10 (60). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00060>
- Fonseca, R. P., Marcotte, K., Hubner, L. C., Zimmermann, N., Netto, T. M., Bizzo, B., Döring, T., Landeira-Fernandez, J., Gasparetto, E. L., Joannette, Y., & Ansaldo, A. I. (2021). The impact of age and education on phonemic and semantic verbal fluency: Behavioral and fMRI correlates [Preprint]. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2021.01.14.426642>
- Ghergulescu, I., & Muntean, C. H. (2016). ToTCompute: A novel EEG-based TimeOnTask threshold computation mechanism for engagement modeling and monitoring. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 26(3), 821–854. <https://doi.org/10.1007/s40593-016-0111-2>
- Hames, E., & Baker, M. (2013, October). EEG-based comparisons of perfor-

- mance on a mental rotation task between learning styles and gender. In *2013 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)* (pp. 1176–1182). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FIE.2013.6685016>
- Henderson, J. M., Choi, W., Lowder, M. W., & Ferreira, F. (2016). Language structure in the brain: A fixation-related fMRI study of syntactic surprisal in reading. *Neuroimage*, 132, 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.02.050>
- Izquierdo, V., & Garrigues, M. L. (2019). Neurocommunicative methodologies: attention and emotion of the audiovisual story in the classroom. *Multidisciplinary Journal for Education, Social and Technological Sciences*, 6 (1), 89–114. <http://dx.doi.org/10.4995/muse.2019.10670>
- Khedher, A. B., Jraidi, I., & Frasson, C. (2019). Tracking students' mental engagement using EEG signals during an interaction with a virtual learning environment. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 11, 1–14. <http://dx.doi.org/10.4236/jilsa.2019.111001>
- Kim, H., Hong, T., Kim, J., & Yeom, S. (2020). A psychophysiological effect of indoor thermal condition on college students' learning performance through EEG measurement. *Building and Environment*, 184 (107223). <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107223>
- Lai, M.-L., Tsai, M.-J., Yang, F.-Y., Hsu, C.-Y., Liu, T.-C., Lee, S. W.-Y., Lee, M.-H., Chiou, G.-L., Liang, J.-C., & Tsai, C.-C. (2013). A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. *Educational Research Review*, 10, 90–115. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2013.10.001>
- Lalancette, H., & Campbell, S. R. (2012). Educational neuroscience: Neuroethical considerations. *International Journal of Environmental and Science Education*, 7 (1), 37–52. https://www.researchgate.net/publication/265110383_Educational_neuroscience_Neuroethical_considerations
- Makransky, G., Terkildsen, T. S., & Mayer, R. E. (2019). Role of subjective and objective measures of cognitive processing during learning in explaining the spatial contiguity effect. *Learning and Instruction*, 61, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2018.12.001>
- Martinez, T., & Zhao, Y. (2018). The impact of mindfulness training on middle grades students' office discipline referrals. *RMLE Online*, 41(3), 1–8. <http://dx.doi.org/10.1080/19404476.2018.1435840>
- Mollo, G., Pulvermüller, F., & Hauk, O. (2016). Movement priming of EEG/MEG brain responses for action-words characterizes the link between language and action. *Cortex*, 74, 262–276. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.10.021>
- Moskvin, V. A., & Moskvina, N. V. (1997). *Neuropedagogy as a new direction of educational technologies. Technologies of the educational process*. OGU Publishing House.

- Nandi, A., Xhafa, F., Subirats, L., & Fort, S. (2021). Real-time emotion classification using eeg data stream in e-learning contexts. *Sensors*, 21 (5), 1589. <https://doi.org/10.3390/s21051589>
- Pi, Z., Zhang, Y., Zhou, W., Xu, K., Chen, Y., Yang, J., & Zhao, Q. (2021). Learning by explaining to oneself and a peer enhances learners' theta and alpha oscillations while watching video lectures. *British Journal of Educational Technology*, 52 (2), 659–679. <http://dx.doi.org/10.1111/bjet.13048>
- Popa, L., Selejan, O., Scott, A., Mureşanu, D. F., Balea, M., & Răfila, A. (2015). Reading beyond the glance: eye tracking in neurosciences. *Neurological Sciences*, 36 (5), 683–688. <https://doi.org/10.1007/s10072-015-2076-6>
- Richardson, D. C., & Spivey, M. J. (2004). Eye tracking: Characteristics and methods. *Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering*, 3, 1028–1042. <http://dx.doi.org/10.1201/b18990-101>
- Sawangjai, P., Hompoonsup, S., Leelaarporn, P., Kongwudhikunakorn, S., & Wilaiprasitporn, T. (2019). Consumer grade EEG measuring sensors as research tools: A review. *IEEE Sensors Journal*, 20 (8), 3996–4024. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2962874>
- Shavit-Cohen, K., & Zion Golumbic, E. (2019). The dynamics of attention shifts among concurrent speech in a naturalistic Multi-speaker virtual environment. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13 (386). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00386>
- Shen, L., Wang, M., & Shen, R. (2009). Affective e-learning: Using “emotional” data to improve learning in pervasive learning environment. *Journal of Educational Technology & Society*, 12 (2), 176–189. <http://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.12.2.176>
- Stewart, P. C. (2015). This is your brain on psychology: Wireless electroencephalography technology in a university classroom. *Teaching of Psychology*, 42(3), 234–241. <https://doi.org/10.1177/0098628315587621>
- Weber, K., Christiansen, M. H., Petersson, K. M., Indefrey, P., & Hagoort, P. (2016). fMRI syntactic and lexical repetition effects reveal the initial stages of learning a new language. *Journal of Neuroscience*, 36(26), 6872–6880. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3180-15.2016>
- Zhou, Y., Xu, T., Li, S., & Shi, R. (2019). Beyond engagement: an EEG-based methodology for assessing user's confusion in an educational game. *Universal Access in the Information Society*, 18 (3), 551–563. <https://doi.org/10.1007/s10209-019-00678-7>