

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ: НАДЕЖНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МОЗГОВОЙ АКТИВАЦИИ В ПРОЦЕССЕ РЕШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Ситникова М.А.¹, Нюрк Г.Х.²

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, e-mail: furmanchuk@bsu.edu.ru

²Университет г. Тюбинген, Тюбинген

В научном обзоре представлены основные преимущества, потенциальные возможности и ограничения в использовании диффузной оптической томографии в сравнении с другими методами нейровизуализации. Рассмотрены основные методологические проблемы изучения активности мозга с помощью технологии функциональной инфракрасной спектроскопии (functional near-infrared spectroscopy), позволяющей в реальном времени измерять модели оксигенации гемоглобина крови в различных областях головного мозга. Показаны особенности применения оптической томографии для изучения различных аспектов формирования математического мышления и выявления специфики нейроактивации в процессе решения различных математических задач на примере исследований в области когнитивной нейробиологии и нейрообразования, проведенных за последние 20 лет. В обзоре представлены исследования, проведенные с испытуемыми разных возрастных групп: взрослыми, детьми школьного возраста, младенцами.

Ключевые слова: диффузная оптическая томография, спектроскопия мозга, методы нейровизуализации, гемодинамическая активность, математическое мышление, когнитивная нейробиология.

FUNCTIONAL OPTICAL TOMOGRAPHY: A RELIABLE METHOD OF MEASURING BRAIN ACTIVATION WHILE DOING VARIOUS MATHEMATICAL TASKS

Sitnikova M.A.¹, Nuerk H.C.²

¹Belgorod State National Research University, Belgorod, e-mail: furmanchuk@bsu.edu.ru;

²Tuebingen University, Tuebingen

This brief scientific review considers main advantages, potential use and limits of diffuse optical tomography (DOT) in comparison with other neuroimaging techniques. The main methodological problems of studying brain activity with the help of functional near infrared spectroscopy (fNIRS), which allows real-time measurement of hemoglobin oxygenation patterns in different brain regions, are highlighted. The peculiarities of using optical imaging for finding out different aspects of development of mathematical thinking and for study of neural activation during mathematical performance based on researches in cognitive neuropsychology and neuroeducation domains, conducted over the past 20 years, are presented. The review presents the studies conducted with subjects of different age groups: adults, school children, infants.

Keywords: diffuse optical tomography, spectroscopy of the brain, neuroimaging techniques, hemodynamic activity, mathematical thinking, cognitive neuropsychology.

Методы нейровизуализации включают в себя магнитную и электроэнцефалографию, а также функциональную магнитно-резонансную (МРТ) и функциональную диффузную оптическую томографию (ДОТ), которые регистрируют магнитные, электрические и гемодинамические колебания, возникающие в связи с мозговой нейронной активностью.

Среди всех методов визуализации мозга функциональная МРТ считается наиболее точным методом неинвазивного функционального картирования. Недавние исследования в области нейровизуализации с помощью МРТ позволили раздвинуть границы ее использования. Она применяется теперь для изучения гемодинамической активности мозга при относительно более естественных обстоятельствах, таких как прослушивание рассказа,

просмотр фильма или визуальной сцены внутри сканера [9; 10; 13]. Тем не менее, несмотря на эти успехи, функциональные исследования нейровизуализации имеют некоторые ограничения в декодировании активности мозга субъекта в пассивных состояниях в ходе экспериментального предъявления раздражителей внутри сканера [5]. Кроме того, существует еще больше ограничений в применении функциональной МРТ для исследований в образовательном контексте.

Доля исследований в нейрокогнитивной психологии и нейрообразовании с применением диффузной оптической томографии (ДОТ), использующей инфракрасное излучение ближней области для изображения отдельных участков головного мозга (NIRS), значительно возросла в последние годы. Ученые все чаще используют его удобство и преимущества для измерения локальных изменений в мозговой гемодинамической активности во время выполнения различных познавательных и образовательных задач [20; 22; 23; 26].

Функциональная диффузная оптическая томография (fNIRS) как перспективный метод нейровизуализации

Функциональная оптическая томография (fNIRS) является эффективным неинвазивным методом визуализации мозга, где в реальном времени происходит измерение моделей оксигенации гемоглобина крови в различных областях головного мозга. Данный метод имеет незначительные критерии исключения и высокую экологическую валидность. Инфракрасная спектроскопия ближней области в качестве инструмента для мониторинга гемодинамики головного мозга была разработана более 30 лет назад, однако для функционального картирования мозга была применена впервые только в начале 1990-х годов.

Использование оптической томографии, так же как и МТТ, опирается на принцип нейроваскулярной связи, известной как гемодинамическая активация или уровень насыщения крови кислородом (индекс сатурации). Нейроваскулярные связи указывают на связь между нейронной активностью и локальными изменениями мозгового кровотока. Однако в отличие от МРТ, которая базируется на контрасте парамагнитных свойств гемоглобина (Hb), оптическая визуализация головного мозга основана на инфракрасном проникновении света внутрь тканей и его поглощении двумя специфическими хромофорами: оксигенированным (O_2Hb) и дезоксигенированным гемоглобином (HHb) в красных кровяных клетках головного мозга [3].

Инфракрасная спектроскопия измеряет гемоглобин только в поверхностном слое коры головного мозга с пространственным разрешением не более 3 см вглубь, когда расстояние между зондами составляет 3 см, что является относительно низким разрешением

по сравнению с функциональной МРТ ([2]). При использовании оптического томографа в динамических исследованиях типичная скорость изображения сигнала составляет порядка нескольких Гц (обычно 10 Гц), что является достаточным, чтобы уловить быстрые физиологические сигналы, такие как изменения гемоглобина вследствие нейроактивации [21].

В оптической томографии используется неионизирующий свет в области спектра (650-950 нм), который находится в пределах безопасного уровня оптического излучения. Интенсивность излучаемого света находится значительно ниже допустимых пределов безопасности, исключает риск термических повреждений и позволяет повторно или в непрерывном режиме в течение длительного времени проводить измерения [19]. В технике инфракрасной спектроскопии ближней области (fNIRS) измеряемое относительное количество поглощенного света с определенной длиной волны может указывать на относительные концентрации оксигемоглобина и дезоксигемоглобина в изучаемой области головного мозга, которые могут быть рассчитаны путем применения модифицированного закона Ламберта-Бера [18]. Высокая активность мозга при выполнении любой задачи, как правило, связана с увеличением окси- и одновременным снижением дезоксигемоглобина.

Оптическая томография позволяет проводить измерения в естественных условиях в положении сидя или при значительно меньших ограничениях двигательной активности, чем другие методы визуализации [27]. Например, функциональная МРТ и электрофизиологические исследования требуют, чтобы субъект находился в специально оборудованном кабинете, в непривычной позе, например в положении лежа на спине, не допускаются любые движения головы, процесс сканирования сопровождается громким шумом, что неблагоприятно отражается на выполнении когнитивных заданий. Тогда как инфракрасная спектроскопия мозга выигрывает по стоимости, бесшумности, мобильности и условиям проведения измерений [14]. Все это определяет преимущества использования оптического томографа в когнитивных исследованиях, где выполняемые задания, такие как мысленное вращение, математические вычисления, сравнение чисел, понимания языка, чтения текстов и так далее, требуют высокого уровня концентрации.

Гемодинамическая активность головного мозга измеряется с помощью многоканальной инфракрасной спектроскопии мозга, при которой несколько пар оптодов (оптических волокон) соединены между собой и размещены на коже головы. Одни оптоды (источники) излучают инфракрасный свет, который передается через кожу головы с помощью оптических волокон, в то время как другие улавливают фотоны и передают их на детекторы. Обязательным условием установления качественной связи между источником и детектором является соприкосновение оптодов с кожей головы, исключая попадание волос в

их зону действия. Каждая пара «источник - детектор» считается точкой измерения (т.е. каналом) [1]. В большинстве устройств используются недорогие лазерные диоды или даже светодиоды. Полупроводниковые лазеры используются в качестве источников света благодаря их эффективности, яркости света и простоте в эксплуатации. Волоконная оптика применяется для передачи света из и в определенный участок коры головного мозга, что позволяет обеспечить большую гибкость в конструкции прибора.

Индивидуальные различия в физических параметрах, таких как толщина черепа и расстояние между черепом и корой, могут существенно повлиять на интерпретацию сигнала в одиночных испытаниях, но на уровне групповых исследований результаты являются достоверными и репродуктивными даже через большие временные промежутки, например через 1 год [8].

Портативность, быстрота подготовки к исследованию, несложная реализация и ненавязчивость измерений облегчают удобство в применении в естественных условиях в образовательных учреждениях. На сегодняшний день исследователи, применяющие оптическую томографию, могут выбирать между несколькими вариантами с различными характеристиками. Применяют многоканальные устройства, использующие непрерывные волны (рис. 1). Есть также портативные, на батарейках, ультралегкие, свободно конфигурируемые системы, которые состоят из небольшого числа источников света и детекторов (рис. 2).

Влияние двигательной активности человека на оптическую томографию незначительно, и поэтому она может широко применяться для изучения таких когнитивных функций, как внимание, память, особенностей овладения языком и решения арифметических задач, которые играют решающую роль в обучении. Область применения оптической томографии включает также сенсорные и моторные функции, эмоции, особенности социального взаимодействия, а также влияние на них различных психических заболеваний и травм.

В данном обзоре рассматриваются только исследования, в которых в качестве испытуемых выступали взрослые и дети без особых образовательных потребностей и проблем в обучении, таких как, например, дислексия или дискалькулия. Однако инфракрасная спектроскопия мозга хорошо переносится пациентами и, следовательно, может существенно расширить данные о нейробиологической основе различных психических расстройств [7; 16].

Применение оптической томографии для изучения мозговой активации в процессе решения арифметических задач

Оптическая томография с успехом применяется для изучения нейрооснов

математического мышления и особенностей вычисления математических задач. Так, в ходе исследования двух областей префронтальной коры с помощью данного метода визуализации головного мозга были выявлены пространственно-временные различия в активации мозга во время решения арифметических задач в уме. Восемь взрослых испытуемых должны были решить три типа различных математических задач. Активность мозга изменялась при выполнении различных умственных задач у разных испытуемых по-разному. При сравнительном анализе результатов оказалось, что активация в двух областях мозга проявляется альтернативно: когда в одной области общий гемоглобин увеличивался, в другой - не было никакой активации в это время; затем ситуация менялась наоборот [11].

В исследованиях, предполагающих изучение особенностей нейронных связей в ситуации увеличения сложности арифметических задач, представленных в устной форме, было выявлено, что более сложные задачи на сложение привели к значительному увеличению кислорода в крови в средней и верхней лобных извилинах [26].

Недавние исследования с помощью инфракрасной спектроскопии показали, что как правая, так и левая теменные доли также играют решающую роль в обработке и решении арифметических задач. Испытуемым предлагалось решить или только прочесть двузначные примеры на сложение, представленные либо в числовых единицах, либо в текстовом формате. Более высокая концентрация оксигемоглобина в теменных областях головного мозга обоих полушарий проявлялась в ситуации, где необходимо было произвести вычисления по сравнению с условием, где надо было только прочесть математические примеры [20].

Так, в исследовании, где испытуемым предлагалось решить представленные в числовом или в текстовом форматах примеры на сложение и вычитание на трех различных уровнях: легком, среднем и сложном, изменения в оксигемоглобине в теменной области левого полушария были выше при решении задач в текстовом формате по сравнению с форматом математических формул. Повышение оксигемоглобина свидетельствует о том, что требуется обработать больше разнообразной информации в процессе принятия решения [25].

Также изучались особенности активации префронтальной коры головного мозга у испытуемых - представителей разных культур при выполнении устных арифметических задач двух уровней сложности: простых (3- и 2-значные слагаемые без эффекта перехода через десяток) и сложных (4- и 3-значные слагаемые с эффектом перехода через десяток). Полученные результаты свидетельствуют, о том, что люди разных культур задействуют различные нейронные связи во время решения арифметических задач [29].

Половые различия при решении познавательных задач также возможно исследовать с помощью инфракрасной спектроскопии [28]. Студенты колледжа (15 мужчин, 15 женщин)

должны были решать умственные арифметические задачи: простые (вычесть 1-значное число из 3-значного) и сложные (вычесть 2-значное число из 3-значного). Полученные данные показали, что половые различия в префронтальной области при выполнении вычислений были связаны с интенсивностью задач. У женщин была выявлена большая эффективность в выполнении задач в сочетании со снижением гемодинамического статуса при выполнении одинаковых умственных арифметических задач.

В некоторых исследованиях изучалась специфика решения арифметических задач у детей школьного возраста. Две большие выборки школьников разных возрастных групп (46 младших школьников и 44 школьника средних классов) изучались в процессе вычисления или чтения арифметических задач (2-значные задачи на сложение с двузначными решениями), которые были представлены или в цифровом, или в текстовом форматах. В эксперименте выяснилось, что, по сравнению с чтением, вычисление активизирует большую оксигенацию в теменной доле и задней части лобной доли [6].

Еще одно исследование было направлено на измерение гемоглобина в префронтальной коре в процессе решения детьми специфических математических задач – танграм-головоломок. В результате эксперимента все дети были разделены на три группы в зависимости от способов решения головоломок. Это позволило выявить различные модели нейроактивации для каждой группы: 1) уровень гемоглобина постоянно увеличивался в группе, которая не смогла выработать единую стратегию решения танграм-головоломок; 2) уровень гемоглобина неуклонно снижался в группе, которая смогла разработать стратегию в процессе работы с головоломками; 3) уровень гемоглобина был устойчивым в группе, у которой уже была выработана стратегия решения до работы с головоломками [15].

Решение задач, предполагающих визуальное предъявление стимульного материала в соотношении с математическими заданиями, как правило, активизирует два различных паттерна. Перечисление групп предметов, представленных в визуальном поле, зависит от количества этих групп. Для небольших групп, как правило, до 4-х предметов, суждения о численном значении выносятся очень быстро, уверенно и точно. Когда эта группа составляет более чем 4 предмета, точное название сменяется подсчетом предметов. Так, в исследовании с помощью многоканального оптического томографа была измерена гемодинамическая активность в латеральных теменно-затылочных участках головного мозга во время задач на перечисления предметов, представленных визуально [4]. Испытуемые должны были назвать количество различных групп точек. Полученные данные показали, что нейронная диссоциация между названием и вычислением была самой сильной с правой стороны внутритеменной борозды головного мозга.

Оптическая томография может успешно применяться и для исследований младенцев.

С использованием технологии оптического сигнала, модифицированного посредством события, было показано, что 6-месячные младенцы могут мысленно представлять и манипулировать приблизительными, символически не выраженными, числовыми величинами [12]. Младенцы рассматривали числовые массивы в необычной парадигме: последовательность изображений, большинство из которых содержали 16 кругов. В ходе экспериментальной проверки с помощью спектроскопии выяснилось, что числовая специализация правой теменной области у детей раннего возраста начинается до активного усвоения языка.

В исследовании особенностей мозговой активности в префронтальной коре в соотношении с частотой сердечных сокращений при выполнении умственных задач на вычитание [24] испытуемым необходимо было вычесть 2-значное число из 4-значного (например, 1022-13) за 60 секунд. Результаты показали существенные изменения в оксигенации в правом полушарии префронтальной коры у тех субъектов, у которых наблюдалось увеличение частоты сердечных сокращений. Эти данные подтверждают гипотезу о том, что правосторонняя активность в префронтальной коре головного мозга преимущественно модулирует симпатические эффекты при выполнении умственных математических задач.

Примером служит комплексное исследование влияния возраста и математической компетентности, а также различных характеристик математических задач, таких как формат (числовые и текстовые задачи) и уровень сложности (с переходом и без перехода через десяток), на успешность решения этих задач у 73 студентов [17]. Были получены следующие результаты: активация в теменной области мозга не зависит от возраста, и лишь в незначительной степени зависит от математической компетентности или характеристик задач. Минимально значимые различия в нейроданных были обнаружены между текстовым и числовым форматами предъявления математических задач. По полученным данным, уровень компетентности взаимосвязан с уровнем сложности заданий, что проявилось в немного более высокой активации в теменной области мозга при решении задач без перехода через десяток, чем задач с переходом через десяток у студентов со средним уровнем компетентности, но не у студентов с другими уровнями компетентности.

Таким образом, различные исследования, направленные на изучение мозговой активации в процессе решения математических задач в разных возрастных группах, показали актуальность и целесообразность применения оптической томографии.

Заключение

Наличие неинвазивных методов для визуализации человеческого мозга позволяет исследовать, как изменяется мозг под влиянием обучения и развития; изучить отделы мозга,

ответственные за формирование и развитие общих когнитивных и ключевых академических навыков, таких как усвоение и понимание языка, решение математических задач.

Многоканальная диффузная оптическая томография, использующая технологию инфракрасной спектроскопии мозга, широко применяется для функциональной нейровизуализации в течение последних двух десятилетий, особенно в тех случаях, когда другие методы нейровизуализации не подходят. Основной функцией инфракрасной спектроскопии (NIRS) является мониторинг активности мозга путем выявления и измерения изменений в концентрации окси- и дезоксигемоглобина с помощью диффузного проникновения инфракрасного света в сочетании с необходимой комбинацией длины волн.

Оптическая томография обладает рядом характеристик, отличающих ее от других методов нейро- и биомедицинской визуализации, таких как рентген, компьютерная томография, МРТ, УЗИ. Оптическая томография является портативной, недорогой, безопасной и не ограничивающей действия испытуемых. В ней нет вредных излучений, и не требуется введения никаких внешних контрастных агентов для получения нейроизображений. Она не производит инструментальный шум, позволяя выполнять умственные задачи без напряжения и стресса, может применяться даже у младенцев и пациентов, у которых есть противопоказания к применению МРТ.

Тем не менее существуют также ограничения в применении оптической томографии. К ним относятся: более низкое пространственное разрешение, чем в МРТ, и более низкое временное разрешение, чем в ЭЭГ; измерение активности только в корковой зоне и невозможность проникнуть в подкорковые области. Также на качество сигнала влияет цвет и толщина волос: густые и темного цвета волосы могут стать причиной появления «шума» в нейроданных.

Сигналы, регистрируемые оптическим томографом, могут комбинироваться и хорошо коррелируют с данными, получаемыми с помощью других методов нейровизуализации, таких как МРТ и ЭЭГ, для получения одновременной, более развернутой информации о мозговой активации. Таким образом, несмотря на указанные ограничения в использовании, оптическая томография является перспективным методом нейровизуализации в рамках образовательного контекста.

Список литературы

1. Boas D.A., Dale A.M., and Franceschini M.A. Diffuse optical imaging of brain activation: approaches to optimizing image sensitivity, resolution, and accuracy // *NeuroImage*. – 2004. - 23 Suppl. 1. – P. 275-288.

2. Cui X., Bray S., Bryant D.M., Glover G.H., and Reiss A.L. A quantitative comparison of NIRS and fMRI across multiple cognitive tasks // *Neuroimage*. – 2011. – 54 (4). – P. 2808–2821.
3. Cutini S., Basso Moro S. and Bisconti S. Functional near infrared optical imaging in cognitive neuroscience: an introductory review // *J. Near Infrared Spectrosc.* – 2012. - V. 20. – P. 75–92.
4. Cutini S., Scatturin P., BassoMoro S., and Zorzi M. Are the neural correlates of subitizing and estimation dissociable? An fNIRS investigation // *Neuroimage*. – 2014. - V. 85. – P. 391–399.
5. Dastjerdi M., Ozker M., Foster B.L., Rangarajan V., Parviz, J. Numerical processing in the human parietal cortex during experimental and natural conditions // *Nature Communications*. – 2013. - V. 4.
6. Dresler T., Obersteiner A., Schecklmann M., Vogel A.C.M., Ehlis A.-C., Richter M.M. et al. Arithmetic tasks in different formats and their influence on behavior and brain oxygenation as assessed with near-infrared spectroscopy (NIRS): a study involving primary and secondary school children // *J. Neural Transm.* – 2009. - V. 116. – P. 1689–1700.
7. Ehlis A.-C., Schneider S., Dresler T. and Fallgatter A.J. Application of functional near-infrared spectroscopy in psychiatry // *Neuroimage*. - 2014. - V. 85. – P. 478–488.
8. Ferrari M., Quaresima V. A brief review on the history of human functional near- infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application // *Neuroimage*. - 2012. - V. 63. – P. 921–935.
9. Hasson U., Malach R., Heeger D.J. Reliability of cortical activity during natural stimulation // *Trends Cogn. Sci.* - 2010. - V. 14. - P. 40–48.
10. Haynes J.D., Rees G. Decoding mental states from brain activity in humans // *Nat. Rev. Neurosci.* – 2006. - V. 7. – P. 523–534.
11. Hoshi Y. and Tamura M. Near-infrared optical detection of sequential brain activation in the prefrontal cortex during mental tasks // *Neuroimage*. - 1997. - 5. - 292.
12. Hyde D., Boas D., Blair C., and Carey S. Near-infrared spectroscopy shows right parietal specialization for number in pre-verbal infants // *Neuroimage*. - 2010. - 53. – P. 647–652.
13. Kay K. N., Naselaris T., Prenger R. J. & Gallant J. L. Identifying natural images from human brain activity // *Nature*. - 2008. - V. 452. – P. 352–355.
14. Koizumi H. Developing the brain: a functional imaging approach to learning and educational sciences // In A.M. Battro, K.W. Fischer, & P.J. Le´na (Eds.). *The educated brain. Essays inneuroeducation*. – Cambridge : Cambridge University Press, 2008. - P. 166–180.
15. Kuroda Y., Okamoto N., Chance B., Nioka S., Eda H., Maesako T. Visualization of children's mathematics solving process using near infrared spectroscopic approach // *Optical Tomography and Spectroscopy of Tissue VIII. Proc. SPIE* . - 2009.

16. Marx A.-M., Ehlis A.-C., Furdea A., Holtmann M., Banaschewski T., Brandeis D., Rothenberger A., Gevensleben H., Freitag C. M., Fuchsengerger Y., Fallgatter A. J. & Strehl U.. Near-infrared spectroscopy (NIRS) neurofeedback as a treatment for children with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) – a pilot study // *Frontiers in Human Neuroscience*. – 2015. - V. 8. – P. 1038.
17. Obersteiner A., Dresler T., Reiss K., Vogel A. C. M., Pekrun R. & Fallgatter A. J. Bringing brain imaging to the school to assess arithmetic problem solving. Chances and limitations in combining educational and neuroscientific research // *ZDM. The International Journal of Mathematics Education*. - 2010. - V. 42 (6). – P. 541-554.
18. Obrig H., Rossi S., Telkemeyer, S., & Wartenburge I. From acoustic segmentation to language processing: Evidence from optical imaging // *Frontiers in Neuroenergetics*. - 2010. - V. 2. – P. 1-12.
19. Plichta M.M., Herrmann M.J., Baehne C.G., Ehlis A.C., Richter M.M., Pauli P., Fallgatter A.J. Event-related functional near-infrared spectroscopy (fNIRS): are the measurements reliable? // *Neuroimage*. - 2006. - V. 31. – P. 116–124.
20. Richter M.M., Zierhut K.C., Dresler T., Plichta M.M., Ehlis A.C., Reiss K. et al. Changes in cortical blood oxygenation during arithmetical tasks measured by near-infrared spectroscopy // *J. Neural Transm.* - 2009. - V. 116. – P. 267–273.
21. Scholkmann F., Kleiser S., Metz A.J., Zimmermann R., MataPavia J., Wolf U. et al. A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology // *Neuroimage*. - 2014. - V. 85. – P. 6–27.
22. Schreppel T., Egetemeir J., Schecklmann M., Plichta M.M., Pauli P., Ellgring H., Fallgatter A.J. and Herrmann M.J. Activation of the prefrontal cortex in working memory and interference resolution processes assessed with near-infrared spectroscopy // *Neuropsychobiology*. - 2008. - V. 57 (4). – P. 188.
23. Strangman G., Boas D.A., Sutton J.P. Non-invasive neuroimaging using near-infrared light // *Biol. Psychiatry*. - 2002. - V. 52. – P. 679–693.
24. Tanida M., Sakatani K., Takano R., Tagai K. Relation between asymmetry of prefrontal cortex activities and the autonomic nervous system during a mental arithmetic task: near infrared spectroscopy study // *Neurosci Lett*. - 2004. - V. 369. – P. 69–74.
25. Trinh N.N.P., Binh N.H., Thien D.D., Khoa T.Q.D. and Toi V.V. Changes in Cortical Blood Oxygenation Responding to Arithmetical Tasks and Measured by Near-Infrared Spectroscopy // *IFMBE Proceedings*. - 2011. - Vol. 35.

26. Verner M., Herrmann M.J., Troche S.J., Roebers C.M., Rammsayer T.H. Cortical oxygen consumption in mental arithmetic as a function of task difficulty: a near-infrared spectroscopy approach // *Front. Hum. Neurosci.* - 2013. - V. 7. – P. 217.
27. Villringer A., Planck J., Hock C., Schleinkofer L., Dirnagl U. Near infrared spectroscopy (NIRS): a new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults // *Neurosci. Lett.* - 1993. - V. 154. – P. 101–104.
28. Yang H., Wang Y., Zhou Z., Gong H., Luo Q., Wang Y., and Lu Z. Sex differences in prefrontal hemodynamic response to mental arithmetic as assessed by near-infrared spectroscopy // *Gender Medicine.* - 2009. - V. 6. – P. 565-574.
29. Yu J., Pan Y., Keng Ang K., Guan C., and Leamy D.J. Prefrontal Cortical Activation during Arithmetic Processing Differentiated by Cultures: A Preliminary fNIRS Study // *34th Annual International Conference of the IEEE EMBS.* - 2012. - P. 4716-4719.