



УДК 159.9

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФFUЗНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ
ТОМОГРАФИИ В НЕЙРООБРАЗОВАНИИ****THE PECULIARITIES OF DIFFUSE OPTICAL TOMOGRAPHY APPLICATION IN
NEUROEDUCATION****М.А. Ситникова
M.A. Sitnikova**

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
Belgorod National Research University, 85, Pobeda Str., Belgorod, 308015, Russia*

E-mail: furmanchuk@bsu.edu.ru

Аннотация. В научном обзоре представлены основные преимущества и ограничения в использовании диффузной оптической томографии в нейрообразовании как активно развивающейся междисциплинарной области исследований, которая позволяет использовать достижения нейронауки для разработки современных стратегий обучения. Рассмотрены основные методологические проблемы изучения гемодинамической активности мозга с помощью технологии функциональной инфракрасной спектроскопии (fNIRS) у здоровых испытуемых, как в лабораторных условиях, так и в реальных жизненных ситуациях. Обзор разнообразных исследований показал возможности и особенности применения оптической томографии для изучения внимания, памяти, математического мышления и особенностей усвоения языка с позиций когнитивной нейронауки.

Abstract. The scientific review presents main advantages and limits of diffuse optical tomography application in neuroeducation as an actively developing interdisciplinary field of research, which can use the achievements of neuroscience for designing innovative strategies of learning. Main methodological problems of studying hemodynamic brain activity with a help of functional near-infrared spectroscopy technology (fNIRS) in healthy subjects both in the laboratory situations and in real life settings. A variety of studies demonstrates the possibilities and opportunities of implementation of optical imaging for the study of attention, memory, mathematical thinking and language acquisition from the stand point of cognitive neuroscience are reviewed.

Ключевые слова: диффузная оптическая томография, инфракрасная спектроскопия мозга, гемодинамическая активность мозга, когнитивная нейропсихология

Keywords: diffuse optical tomography, near-infrared spectroscopy of the brain, hemodynamic activity of the brain, cognitive neuropsychology

Введение

Нейрообразование – это недавно появившаяся и активно развивающаяся междисциплинарная область исследований, в основе которой лежит связь нейронауки с образовательной практикой. Основная идея заключается в возможности применять нейротехнологии в современном образовании, использовать достижения нейронауки для разработки современных стратегий обучения и развития. Значительное увеличение интереса современного общества к нейронауке и междисциплинарному сотрудничеству в рамках нейрообразования обусловлено важностью применения достижений нейронауки для разработки технологий развития когнитивных функций (памяти, математического мышления, языковых способностей, внимания), а также нейротехнологий, направленных на уменьшение и предотвращение информационных перегрузок.

Исследования в области нейрообразования строятся на основе парадигм и концепций, которые были разработаны в когнитивной, возрастной и педагогической психологии, с одной стороны и, на результатах разноплановых исследований головного мозга в рамках нейронауки, которая объединяет такие научные дисциплины, как нейрофизиологию, нейроанатомию, нейропсихологию и компьютерное моделирование, с другой стороны. Также одним из перспективных научных направлений в исследовании человеческого мозга в настоящее время является когнитивная нейронаука (cognitive neuroscience).

Взаимосвязь между нейронаукой и образованием рассматривается многими учеными как «двустороннее движение» (a two-way street scenario) [Geake, 2004], в котором, с одной стороны,



предполагается их сочетание в научных исследованиях, с другой стороны, каждая из наук убедительно представляет собственные исследования [Mason, 2009; Ansari, 2006]. Некоторые исследователи [Ansari & Coch, 2006; Goswami, 2006] согласны, что тесное сотрудничество нейронауки и образования может привести в будущем к улучшению технологий преподавания. Безусловным преимуществом также является возможность в рамках образовательного контекста изучения особенностей активации мозга в естественных условиях [De Smedt et al., 2011; Obersteiner et al., 2010].

На сегодняшний день вопрос о том, насколько ясно представляют себе педагоги возможность использования нейронаучных данных в профессиональной деятельности, остается мало изученным [Hook & Farah, 2013]. Очевидно, что в рамках собственно нейронаучных исследований невозможно разработать инновационные программы преподавания и создать инновационную развивающую среду обучения учащихся. Нейронаука играет важную роль только как часть междисциплинарной парадигмы [Howard-Jones, 2011]. Очевидно, что нейрообразование имеет ряд методологических трудностей и подводных камней. Наиболее явными из них являются нереалистичные ожидания немедленного внедрения результатов нейронауки в образовательную практику, а также отсутствие междисциплинарной профессиональной подготовки, что приводит к отсутствию взаимопонимания между педагогами и нейропсихологами и нейрофизиологами [Van der Meulen et al., 2015]. Потенциал ее применения в образовании заключается в создании более глубокого понимания основных когнитивных механизмов и патомеханизмов процесса обучения и образовательных программ [Stubenrauch et al., 2014; Smeyers, 2016].

Ученые в области образования, как правило, изучают эффекты влияния различных когнитивных задач на поведенческие переменные и используют эти данные для проверки моделей функционирования различных когнитивных функций. Однако поведенческих данных, полученных с помощью бланковых методик, с научной точки зрения недостаточно для изучения когнитивных процессов и особенностей усвоения и применения знаний. Возникающие пробелы успешно компенсируются с помощью методов нейровизуализации. Наиболее значительного прогресса в понимании взаимосвязи между мозгом и процессом познания и отражения действительности удалось достичь именно с позиций функциональной визуализации мозга. За последнее десятилетие прогресс в применении методов нейровизуализации позволил получить новые знания о функциональных и структурных изменениях в головном мозге в процессе обучения. Однако, при переходе от поведенческого подхода к применению методов нейровизуализации, исследователи часто сталкиваются с методологическими и этическими проблемами, которые мешают организации и проведению эксперимента, особенно при работе с детьми [Poldrack, 2006].

Разнообразные методы визуализации мозга могут обеспечить различные измерения нейронных коррелятов когнитивных процессов, на которых базируются школьные умения и навыки, такие как чтение и арифметика, а также позволяет изучить, как изменяются нейронные связи под влиянием обучения и развития. Возможность визуализации различных областей головного мозга может помочь ученым понять типичные и атипичные траектории развития, чтобы лучше охарактеризовать пределы пластичности различных участков мозга, ответственных за когнитивные функции, сформированные под влияние обучения, на более глубинном уровне, чем на основе только поведенческих методик исследования [Grabner & Ansari, 2010].

Функциональная диффузная оптическая томография как перспективный метод нейровизуализации в нейрообразовании

Методы нейровизуализации, изучающие нейронную активность, включают в себя: магнитную и энцефалографию, функциональную магнитно-резонансную (МР) и позитронно-эмиссионную (ПЭ) томографию, а также относительно новую в нейронауке функциональную оптическую томографию (fNIRS).

Доля исследований с применением диффузной оптической томографии в рамках нейрокогнитивной психологии и нейрообразования значительно возросла за последние годы. Ученые все чаще используют ее удобство и преимущества для измерения оптического спектра абсорбции гемоглобина в зависимости от насыщения мозга кислородом во время выполнения различных познавательных задач [Richter et al., 2009; Schreppele et al., 2008; Verner et al., 2013].

Диффузная оптическая томография (ДОТ) головного мозга - способ нейровизуализации, использующий инфракрасное излучение ближней области для изображения отдельных участков головного мозга. Инфракрасная спектроскопия (fNIRS) в качестве инструмента мониторинга гемодинамики головного мозга была разработана более 30 лет назад, однако для функционального картирования была применена впервые только в начале 1990-х годов.

Функциональная оптическая томография является эффективным неинвазивным методом визуализации мозга, где в реальном времени происходит измерение моделей оксигенации крови гемоглобином в различных областях головного мозга. Данный метод имеет незначительные критерии исключения и высокую экологическую валидность. Уровень оптического излучения (об-



ласть спектра от 650 нм до 950 нм) исключает риск термических повреждений и облучения. Портативность обеспечивает возможность измерений в естественных условиях, что особенно удобно в образовательных учреждениях, в работе с детьми и даже младенцами. Отсутствуют вредные кумулятивные эффекты, что позволяет повторно или в непрерывном режиме в течение длительного времени проводить измерения [Plichta at al., 2006]. Наибольшим недостатком технологии является невозможность идентифицировать активность нейронов более чем несколько сантиметров в глубину. С помощью инфракрасной спектроскопии гемоглобин измеряется 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 [Cui at al., 2011].

Таким образом, к основным преимуществам относятся безопасность, портативность, бесшумность и ненавязчивость измерений, которые могут быть реализованы в сидячем положении, при незначительных ограничениях двигательной активности [Villringer, 1993]. Все эти преимущества играют ключевую роль в когнитивных исследованиях, где выполняемые задания требуют высокого уровня концентрации.

Оптическая томография также имеет свои преимущества с точки зрения специфики нейрообразования. При изучении активации у маленьких детей, даже несколько недель обучения в классе может привести к существенным индивидуальным различиям, которые могут исказить групповые результаты. Структура знаний детей также может измениться в течение этого промежутка времени, что также приведет к различиям на поведенческом и нейрофизиологическом уровнях. Таким образом, время, затраченное на проведения эксперимента, является весьма актуальным фактором с точки зрения рассмотрения эффективности и результативности обучения. Оптическая томография позволяет изучать большую выборку испытуемых в течение короткого периода времени (от 14 до 30 дней).

Применение функционального оптического томографа в научных исследованиях в области обучения и образования

Функциональная оптическая томография широко применяется для изучения таких когнитивных функций, как внимание, память, язык и математические способности, которые играют решающую роль в обучении. В данном научном обзоре представлены разнообразные исследования, раскрывающие особенности образовательного процесса с позиций когнитивной нейронауки.

Важно отметить, что в данном обзоре представлены 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 следует отметить, что инфракрасная спектроскопия хорошо переносится пациентами с различными расстройствами и, следовательно, может существенно расширить данные о нейробиологической основе различных психических расстройств [Ehlis at al., 2014; Marx at al., 2015].

Математическое мышление

Оптическая томография с успехом применяется для изучения нейро основ математического мышления. 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. 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 [Hoshi & Tamura, 1993].

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 [Richter at all, 2009].

В некоторых исследованиях данная техника использовалась для измерения специфики 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 [Dresler at al., 2009].

Половые различия при решении познавательных задач также возможно исследовать с помощью инфракрасной спектроскопии [Yang at al., 2009]. 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.

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 приближительными, символически не выраженными, числовыми величинами [Hyde at al., 2010]. 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.

Язык и речь

Роль функциональной оптической томографии в изучении особенностей функционирования и усвоения языка было показано в более чем 60 исследованиях, проведенных с разными испытуемыми: младенцами, детьми, взрослыми [Quaresima at all, 2011; Obrig at al., 2010]. Данный метод зарекомендовал себя как гибкий и надежный инструмент картирования особенностей активации в корковых зонах головного мозга во время чтения [Fallgatter at all, 1998], распознавания и восприятия речи [Fuguu & Mori, 2003]. Для выявления специфики функционирования речи у здоровых испытуемых в нейropsихологических исследованиях наиболее часто используются такие методы, как письменное или устное словообразование [Herrmann at al., 2005], тесты на беглость речи [Schecklmann at al., 2008].

Многие исследования с использованием оптического томографа были направлены на выявление нейронных коррелятов языка при генерации слов. В процессе выполнения тестовых заданий на беглость речи у испытуемых обычно повышался оксигемоглобин при одновременном снижении дезоксигемоглобина в дорсолатеральной префронтальной зоне коры головного мозга. По данным некоторых исследователей были выявлены левосторонние паттерны активации [Herrmann at al., 2006], тогда как в других исследованиях эффекты латеральности обнаружены не были [Matsuo at al., 2004].

Интересным примером применения оптической томографии является исследование процесса продуцирования речи во время социальных взаимодействий. Во время диалога у испытуемых наблюдалась значительная мозговая активации в лобной и верхней височной областях. При этом более высокая активация наблюдалась в фазе говорения, чем слушания [Suda at al., 2010].

Особенности мозговой организации людей, владеющих несколькими языками, также могут изучаться с помощью оптического томографа [Kovelman at al., 2008]. Изменения в оксигенации в зоне Брока в ответ на перевод коротких фраз вслух при переключении с одного языка на другой были исследованы у голландских студентов, владеющих в совершенстве английским языком. Перевод фраз привел к последовательному и поэтапному повышению оксигемоглобина в сочетании с небольшим снижением дезоксигемоглобина в левосторонней нижней лобной зоне, которая включает в себя зону Брока, что подтверждает участие данной зоны в процессе перевода вне зависимости от направления перевода.

Память и внимание

Память является ключевой функцией для различных когнитивных процессов. Оптическая томография широко применяется как инструмент для измерения активации в префронтальной коре головного мозга при выполнении заданий на запоминание [Schreppel at al., 2008; Ogawa at al., 2014].

Хорошо известно, что латеральные участки префронтальной коры играют центральную роль в функционировании памяти. Изменения в мозговой активации сначала изучались у взрослых испытуемых, которым предлагались задачи на узнавание в условиях различной нагрузки на память. Затем эта же техника была применена к 5- и 6-летним детям. Было выявлено, что двусторонняя активация префронтальной коры характерна как взрослым, так и детям дошкольного возраста в процессе выполнения этой задачи [Tsujimoto at al., 2004].



Гендерные различия в оперативной памяти у 50 испытуемых (26 мужчин и 24 женщин) изучались в процессе выполнения вербального варианта задачи n-назад (n-back task). Изменения в концентрациях окси-, дезокси- и общего гемоглобина записывались одновременно. Мужчины показали двустороннюю активацию с небольшим левосторонним преобладанием, тогда как у женщин была выявлена явная левосторонняя активация. Активации у мужчин была более обширной и сильной, чем у женщин [Li at al., 2010].

Не только память, но и внимание широко изучается с помощью оптической томографии. Например, гемодинамические изменения регистрировались в процессе выполнения теста на внимания (continuous performance test), где необходимо было выбирать на экране редко встречающиеся буквы. Увеличение оксигемоглобина было обнаружено в дорсолатеральной префронтальной коре [Toichi at al., 2004].

В исследовании, посвященном изучению нейрофизиологических основ произвольного зрительно-пространственного внимания, было выявлено, что увеличение сосредоточения внимания привело к значительному увеличению мозговой активации в левой визуальной области по сравнению с правой [Harasawa & Shioiri, 2011].

С помощью оптической томографии сравнили особенности мозговой активации в лобной и теменной долях при выполнении задачи на мысленное вращения фигуры (пространственно-образная задача) у праворуких и леворуких женщин. Полученные результаты продемонстрировали латеральные межполушарные различия в пространственной ориентации испытуемых. Праворукие продемонстрировали правостороннее доминирование, в то время как леворукие показали небольшое левостороннее доминирование мозговой активности, как в лобной, так и в теменной долях [Shimoda at al., 2008].

В целом, сигналы, регистрируемые оптическим томографом, могут комбинироваться и хорошо коррелируют с данными, получаемыми с помощью других методов нейровизуализации, таких как МРТ [Cui at al., 2010] и ЭЭГ [Ehlis at al., 2009; Koch at al., 2009] для получения одновременной более развернутой информации о мозговой активации.

Заключение

Нейрообразование предполагает "двуязычие" специалистов, т.е. необходимость разбираться как в языке нейронауки, так и в процессах преподавания и обучения. С одной стороны, любое прямое использование достижений нейронауки в практике образования недопустимо, так как мозг является лишь одним из компонентов, определяющих процесс обучения, наряду с социальными, культурными и контекстными факторами, включая взгляды, ценности и убеждения учащихся и учителей. Поэтому, достижения нейронауки должны использоваться в разработках инновационных обучающих и развивающих технологий наряду с другими соответствующими областями научных исследований, которые способствуют пониманию учебных и воспитательных процессов. С другой стороны, система образования определяет те задачи, теории и модели, которые необходимо изучать с помощью нейронауки.

Применение в психолого-педагогических исследованиях неинвазивных инструментов для визуализации человеческого мозга позволило выявить, как изменяется мозг под влиянием обучения и развития; изучить отделы мозга, ответственные за формирование и развитие ключевых академических навыков, таких как усвоение и понимание языка, решения арифметических задач, а также более общих когнитивных навыков, таких как память и внимание. Оптическая томография, являясь относительно новой в науке, уже зарекомендовала себя как надежный метод нейровизуализации для изучения гемодинамических изменений в корковых отделах головного мозга, который может быть использован как в лабораторных, так и в естественных условиях. Это позволяет принести оборудование, необходимое для оптической томографии в здании школы, чтобы изучать мозговую активацию школьников в привычной для них среде.

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. Она не производит инструментальный шум, позволяя выполнять умственные задачи без напряжения и стресса, может применяться как у взрослых, так и у детей.

Оптическая томография выступает как универсальная и перспективная техника исследования нейронных связей человеческого познания в нейрообразовании.



Список литературы

- Ansari D., Coch D. 2006. Bridges over troubled waters: education and cognitive neuroscience. *Trends Cogn. Sci.*, 10: 146–151.
- Ansari D., De Smedt B., Grabner R.H. 2012. Neuroeducation - A critical overview of an emerging field. *Neuroethics*, V. 5, Issue 2: 105-117.
- Cui X., Bray S., Bryant D.M., Glover G.H. and Reiss A.L.. 2010. A quantitative comparison of NIRS and fMRI across multiple cognitive tasks. *NeuroImage*, 54, 2808.
- De Smedt B., Ansari D., Grabner R.H., Hannula-Sormunen M., Schneider M., Verschaffel L. 2011. Cognitive neuroscience meets mathematics education: It takes two to Tango. *Educational Research Review* 6: 232–237.
- Dresler T., Obersteiner A., Schecklmann M., Vogel A., Ehlis A.-C., Richter M. M., et al. 2009. 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.* 116: 1689–1700.
- Ehlis A.-C., Ringel T.M., Plichta M.M., Richter M.M., Herrmann M.J. and Fallgatter A.J. 2009. Cortical correlates of auditory sensory gating: A simultaneous nearinfrared spectroscopy event-related potential study. *Neuroscience* 159: 1032.
- Ehlis A.-C., Schneider S., Dresler T., and Fallgatter A.J. 2014. Application of functional near-infrared spectroscopy in psychiatry. *Neuroimage* 85: 478–488.
- Fallgatter A. J., Muller T. J., & Strik W. K. 1998. Prefrontal hypooxygenation during language processing assessed with nearinfrared spectroscopy. *Neuropsychobiology*, 37: 215-218.
- Furuya I., & Mori K. 2003. Cerebral lateralization in spoken language processing measured by multi-channel near-infrared spectroscopy (NIRS). *Brain and Nerve*, 55: 226-231.
- Geake J.G. 2004. Cognitive neuroscience and education: two-way traffic or one-way street? *Westminster Stud. Educ.* 27: 87–98.
- Goswami U. 2006. Neuroscience and education: from research to practice? *Nat.Rev. Neurosci.* 7: 406–411.
- Grabner R.H., Ansari D. 2010. Promises and potential pitfalls of a ‘cognitive neuroscience of mathematics learning. *Zdm: The international journal of mathematics education* 42(6): 655-660.
- Harasawa M. & Shioiri S. 2011. Asymmetrical brain activity induced by voluntary spatial attention depends on the visual hemifield: A functional near-infrared spectroscopy study. *Brain Cogn.* 75, 292.
- Herrmann M.J., Ehlis A.C., Scheuerpflug P. and Fallgatter A.J. 2005. Optical topography with near-infrared spectroscopy during a verbal-fluency task. *J. Psychophysiol.* 19(2), 100.
- Herrmann M.J., Walter A., Ehlis A.C. and Fallgatter A.J. 2006. Cerebral oxygenation changes in the prefrontal cortex: Effects of age and gender. *Neurobiol. Aging* 27(6), 888.
- Hook C.J., Farah M.J. 2013. Neuroscience for educators: What are they seeking, and what are they finding? *Neuroethics*, V. 6, Issue 2: 331-341.
- Hoshi Y. & Tamura M. 1997. Near-infrared optical detection of sequential brain activation in the prefrontal cortex during mental tasks *NeuroImage* 5, 292.
- Howard-Jones P. 2011. A Multiperspective Approach to Neuroeducational Research. *Educational Philosophy and Theory*, Vol. 43, No. 1.
- Hyde D., Boas D., Blair C., and Carey S. 2010. Near-infrared spectroscopy shows right parietal specialization for number in pre-verbal infants. *Neuroimage* 53: 647–652.
- Koch S.P., Werner P., Steinbrink J., Fries P. and Obrig H. 2009. Stimulus-induced and state-dependent sustained gamma activity is tightly coupled to the hemodynamic response in humans. *J. Neurosci.* 29, 13962.
- Kovelman I., Shalinsky M.H., White K.S., Schmitt S.N., Berens M.S., Paymer N. and Petitto L.-A. 2008. Dual language use in sign-speech bimodal bilinguals: fNIRS brain-imaging evidence. *Brain Lang.* 109, 112.
- Li T., Luo Q, Gong H. 2010. Gender-specific hemodynamics in prefrontal cortex during a verbal working memory task by near-infrared spectroscopy. *Behavioural Brain Research* 209: 148-153.
- Mason L. 2009. Bridging neuroscience and education: a two-way path is possible. *Cortex*, 45(4): 548–549.
- Matsuo K., Watanabe A., Onodera Y., Kato N. and Kato T. 2004. Prefrontal hemodynamic response to verbal-fluency task and hyperventilation in bipolar disorder measured by multi-channel near-infrared spectroscopy. *J. Affect. Disord.* 82(1), 85.
- Marx A.-M., Ehlis A.-C., Furdea A., Holtmann M., Banaschewski T., Brandeis D., Rothenberger A., Gevensleben H., Freitag C. M., Fuchsberger Y., Fallgatter A. J. & Strehl U. 2015. Near-infrared spectroscopy (NIRS) neurofeedback as a treatment for children with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) – a pilot study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 1038.
- Obersteiner A., Dresler T., Reiss K., Vogel A. C. M., Pekrun R. & Fallgatter A. J. 2010. 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*, 42(6): 541-554.
- Obrig H., Rossi S., Telkemeyer S., & Wartenburger I. 2010. From acoustic segmentation to language processing: Evidence from optical imaging. *Frontiers in Neuroenergetics*, 2: 1-12.
- Plichta MM, Herrmann MJ, Baehne CG, Ehlis AC, Richter MM, Pauli P, Fallgatter AJ 2006. Event-related functional near-infrared spectroscopy (fNIRS): are the measurements reliable? *Neuroimage* 31:116–124.
- Poldrack R. A. 2006. Can cognitive processes be inferred from neuroimaging data? *Trends in Cognitive Sciences*, 10: 59-63.
- Quaresima V., Bisconti S. & Ferrari M. 2011. A brief review on the use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for language imaging studies in human newborns and adults. *Brain and Language*, 121: 79-89.
- Richter M. M., Zierhut K. C., Dresler T., Plichta M. M., Ehlis A. C., Reiss K., et al. 2009. Changes in cortical blood oxygenation during arithmetical tasks measured by near-infrared spectroscopy. *J. Neural Transm.* 116: 267–273.



Schecklmann M., Ehlis A. C., Plichta M. M., & Fallgatter A. J. 2008. Functional near-infrared spectroscopy: a long-term reliable tool for measuring brain activity during verbal fluency. *Neuroimage*, 43(1): 147–155.

Schreppel T., Egetemeir J., Schecklmann M., Plichta M.M., Pauli P., Ellgring H., Fallgatter A.J. and Herrmann M.J. 2008. Activation of the prefrontal cortex in working memory and interference resolution processes assessed with near-infrared spectroscopy. *Neuropsychobiology* 57(4), 188.

Shimoda N., Takeda K., Imai I., Kaneko J., Kato H. 2008. Cerebral laterality differences in handedness: A mental rotation study with NIRS *Neuroscience Letters* 430: 43–47.

Smeyers, P. 2016. *Neurophilia: Guiding Educational Research and the Educational Field?* Volume 50, Issue 1: 62-75.

Stubenrauch C., Krinzinger H., Konrad K. 2014. From brain imaging to good teaching? Implications from neuroscience for research on learning and instruction. *Zeitschrift für Kinder- und Jugendpsychiatrie und Psychotherapie*, V. 42, Issue 4: 253-269.

Suda M., Takei Y., Aoyama Y., Narita K., Sato T., Fukuda M. and Mikuni M. 2010. Frontopolar activation during face-to-face conversation: an *in situ* study using nearinfrared spectroscopy. *Neuropsychologia* 48, 441.

Toichi M., Findling R.L., Kubota Y., Calabrese J.R., Wiznitzer M., McNamara N.K. and Yamamoto K. 2004. Hemodynamic differences in the activation of the prefrontal cortex: attention vs. higher cognitive processing. *Neuropsychologia* 42, 698.

Tsujimoto S., Yamamoto T., Kawaguchi H., Koizumi H., and Sawaguchi T. 2004. Prefrontal cortical activation associated with working memory in adults and preschool children: an event-related optical topography study. *Cereb. Cortex* 14: 703–712/43.

Van der Meulen A., Krabbendam L. & de Ruyter D. 2015. Educational Neuroscience: Its Position, Aims and Expectations. *British Journal of Educational Studies*, V. 63, Issue 2: 229-243.

Verner M, Herrmann MJ, Troche SJ, Roebbers CM, Rammsayer TH. 2013. Cortical oxygen consumption in mental arithmetic as a function of task difficulty: a near-infrared spectroscopy approach. *Front Hum Neurosci.* 7: 217.

Villringer A, Planck J, Hock C, Schleinkofer L, Dirnagl U 1993. Near infrared spectroscopy (NIRS): a new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults. *Neurosci Lett* 154: 101–104.

Yang H., Wang Y., Zhou Z., Gong H., Luo Q., Wang Y., and Lu Z. 2009. Sex differences in prefrontal hemodynamic response to mental arithmetic as assessed by near-infrared spectroscopy. *Gender Medicine* 6: 565-574.