

УДК 612.014.423

doi: <https://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2024-10-4-120-130>

ПОИСК СВЯЗЕЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА С ПОКАЗАТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

¹А. Б. Мулик*, ¹И. В. Улесикова, ¹Д. В. Моисеев, ¹Ю. А. Шатыр, ²М. А. Кунавин, ³А. Н. Долецкий

¹ Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

² Северный (Арктический) федеральный университет, г. Архангельск, Россия

³ Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

ВВЕДЕНИЕ. Первоначально разработанная технология функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (Functional near-infrared spectroscopy, fNIRS) для клинического мониторинга оксигенации тканей коры головного мозга не нашла широкого применения в исследовательской практике. Объединение функциональной спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона и электроэнцефалографии (ЭЭГ) дает уникальную возможность мультимодальной визуализации функций мозга человека в нескольких пространственных и временных масштабах.

ЦЕЛЬ. Выявить связи стандартных показателей fNIRS с показателями ЭЭГ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В исследовании приняли участие 100 клинически здоровых мужчин и женщин 18–25 лет, европеоидной расы, коренных жителей Республики Крым, Волгоградской и Архангельской областей. Каждый испытуемый последовательно проходил fNIRS- и ЭЭГ-тестирование. Статистический анализ данных выполняли по коэффициенту корреляции Пирсона.

РЕЗУЛЬТАТЫ. На этапах съема фоновых показателей с открытыми глазами и съема показателей с закрытыми глазами перед фотостимуляцией выявлены множественные прямые сильные корреляции электрического потенциала ЭЭГ с показателем оксигенированного (HbO) и обратные сильные связи с показателем деоксигенированного (HbR) гемоглобина. На этапе фотостимуляции с частотой 5 Гц наблюдалась обратная связь относительно этапов съема фоновых показателей и съема показателей с закрытыми глазами перед началом фотостимуляции. Обнаружено множество обратных сильных корреляций электрического потенциала ЭЭГ с показателем HbO и прямых сильных корреляций с показателем HbR. Этап фотостимуляции с частотой 10 Гц характеризовался минимальным количеством корреляций анализируемых показателей. На этапе фотостимуляции с частотой 15 Гц были выявлены обратные сильные корреляционные связи электрического потенциала ЭЭГ с показателем HbO и прямые сильные корреляции с показателем HbR.

ОБСУЖДЕНИЕ. Содержание кислорода в кровеносных сосудах головного мозга в состоянии покоя прямо коррелирует с выраженностью амплитуды его электрической активности. Учитывая, что состояние покоя на ЭЭГ характеризуется доминированием относительно высокоамплитудной и низкочастотной альфа-активности, такого рода связи вполне логичны. Можно предположить, что переход головного мозга в состояние спокойного бодрствования и режим ожидания стимуляции, который сопровождается замедлением общей ритмики на ЭЭГ и ростом ее абсолютной амплитуды, связан с общим снижением активности нейронных ансамблей, что выражается в снижении уровня метаболизма и потребления кислорода тканями. В такой ситуации большая доля гемоглобина остается в оксигенированной форме, а доля HbR оказывается относительно мала. Фотостимуляция на частотах 5, 10 и 15 Гц приводит к изменению картины корреляционных связей между показателями fNIRS и ЭЭГ. Это касается как количества, так и характера обнаруженных статистически значимых корреляций. Наименьшее количество связей отмечали при стимуляции на частоте 10 Гц, при этом сохранялась общая выявленная закономерность: концентрация HbO прямо коррелировала с амплитудой ЭЭГ, а концентрация HbR – обратно. С точки зрения функционирования ритмогенных структур головного мозга, фотостимуляция на частоте 10 Гц является наиболее нейтральной, поскольку совпадает с доминирующим ритмом покоя взрослого человека (альфа-ритм с частотой 10 ± 1 Гц). Таким образом, можно предположить, что навязывание внешнего ритма с частотой, близкой к естественным частотам ритмогенных структур, приводит к снижению жесткости взаимосвязей между электрической активностью головного мозга и его обеспеченностью кислородом.

© Авторы, 2024. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины федерального медико-биологического агентства». Данная статья распространяется на условиях «открытого доступа» в соответствии с лицензией ССВУ-NC-SA 4.0 («Attribution-NonCommercial-ShareAlike» / «Атрибуция-Некоммерчески-Сохранение Условий» 4.0), которая разрешает неограниченное некоммерческое использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии указания автора и источника. Чтобы ознакомиться с полными условиями данной лицензии на русском языке, посетите сайт: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.ru>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего изучения взаимосвязей fNIRS и показателей ЭЭГ, обеспечивающих возможность мультимодальной визуализации функций мозга в условиях эксперимента и клинической практики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морская медицина, электроэнцефалография, ЭЭГ, функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия, fNIRS, нервно-сосудистая связь

*Для корреспонденции: Мулик Александр Борисович, e-mail: mulikab@mail.ru

*For correspondence: Alexander B. Mulik, e-mail: mulikab@mail.ru

Для цитирования: Мулик А. Б., Улесикова И. В., Моисеев Д. В., Шатыр Ю. А., Кунавин М. А., Долецкий А. Н. Поиск связей показателей функциональной спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона с показателями электроэнцефалографии: экспериментальное исследование // *Морская медицина*. 2024. Т. 10, No. 4. С. 120–130, doi: <https://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2024-10-4-120-130> EDN: <https://elibrary.ru/IUXFFU>
For citation: Mulik A. B., Ulesikova I. V., Moiseev D. V., Shatyr Yu. A., Kunavin M. A., Doletsky A. N. Search for relationships between functional near-infrared spectroscopy indices and electroencephalography indices: experimental study // *Marine medicine*. 2024. Vol. 10, No. 4. P. 120–130, doi: <https://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2024-10-4-120-130> EDN: <https://elibrary.ru/IUXFFU>

SEARCH FOR RELATIONSHIPS BETWEEN FUNCTIONAL NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY INDICES AND ELECTROENCEPHALOGRAPHY INDICES: EXPERIMENTAL STUDY

¹Alexandr B. Mulik*, ¹Irina V. Ulesikova, ¹Daniil V. Moiseev, ¹Yulia A. Shatyr,

²Mikhail A. Kunavin, ³Alexey N. Doletsky

¹Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia

²Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

³Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

INTRODUCTION. Originally developed functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) technology for clinical monitoring of cortical tissue oxygenation has not been widely used in research practice. The combination of functional near-infrared spectroscopy and electroencephalography (EEG) provides a unique opportunity for multimodal visualization of human brain function on several spatial and time scales.

OBJECTIVE. Determine correlation between standardized fNIRS indices and EEG parameters.

MATERIALS AND METHODS. The study involved 100 clinically healthy men and women aged 18–25 of the Caucasian race, native residents of the Republic of Crimea, Volgograd and Arkhangelsk regions. Each subject underwent fNIRS- and EEG-testing consecutively. Statistical data analysis was performed by the Pearson correlation coefficient

RESULTS. At the stage of taking background rates with eyes open and the ones with eyes closed before photostimulation, multiple direct strong correlations of EEG electrical potential with the index of oxygenated (HbO) and inverse strong correlations with the index of deoxygenated (HbR) hemoglobin were revealed. At the stage of photostimulation with the frequency of 5 Hz, an inverse correlation was observed with respect to the stages of taking background rates and the ones with eyes closed before the start of photostimulation. Many inverse strong correlations of EEG electric potential with HbO index and direct strong correlations with HbR index were detected. The stage of photostimulation with a frequency of 10 Hz was characterized by the minimum number of correlations of the analyzed parameters. At the stage of photostimulation with a frequency of 15 Hz, strong inverse correlations of EEG electric potential with HbO and direct strong correlations with HbR were revealed.

DISCUSSION. The oxygen content in the blood vessels of the brain at rest directly correlates with the amplitude of its electrical activity. Given that a state of rest on the EEG is characterized by the dominance of relatively high amplitude and low-frequency alpha activity, this kind of correlation is quite logical. It can be assumed that the brain transition into the state of quiet wakefulness and the mode of waiting for stimulation, which is accompanied by a slowing down of the general rhythm on the EEG and an increase in its absolute amplitude, is associated with a general decrease in the activity of neuronal ensembles, which is expressed in a decrease in the level of metabolism and oxygen consumption by tissues. In this case, a large proportion of hemoglobin remains in the oxygenated form, and the proportion of HbR is relatively small. Photostimulation at frequencies of 5, 10 and 15 Hz leads to changes in the pattern of correlations between fNIRS and EEG indices. This applies to both the number and the nature of statistically significant correlations detected. The least number of correlations was observed during stimulation at 10 Hz, while the general revealed pattern held true: HbO concentration correlated directly with EEG amplitude, and HbR concentration – inversely. In terms of functioning of the brain rhythmogenic structures, photostimulation at a frequency of 10 Hz is the most neutral as it coincides with the adult's dominant resting rate (alpha rhythm with a frequency of 10 ± 1 Hz). Thus, it can be assumed that the imposition of an external rhythm with a frequency

close to the natural frequencies of rhythmogenic structures leads to a decrease in the rigidity of correlations between the electrical activities of the brain and its oxygen supply.

CONCLUSION. The obtained results confirm the prospect of further research on correlations between fNIRS and EEG indices, providing the possibility of multimodal visualization of brain functions under experimental conditions and clinical practice.

KEYWORDS: marine medicine, electroencephalography, EEG, functional near-infrared spectroscopy, fNIRS, neurovascular connection

Введение. Функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия (Functional near-infrared spectroscopy, fNIRS) – это неинвазивный метод функциональной нейровизуализации гемодинамики тканей мозга [1]. Посредством применения пар оптодов (излучателя и детектора света) производится спектроскопия различных участков головного мозга. Изменения в количестве рассеянного света, фиксируемого детектором, соответствуют изменениям оптических свойств ткани в зоне расположения оптодов. Из-за низкой поглощающей способности гемоглобина в диапазоне длин волн от 650 до 1000 нм свет в ближнем инфракрасном диапазоне может проникать на несколько сантиметров сквозь кожу головы, череп и в отраженном виде, достигая детектора, характеризовать концентрацию оксигенированного (HbO), деоксигенированного (HbR) и общего гемоглобина в тканях мозга. Благодаря своей безопасности, низкой стоимости, портативности и высокому временному разрешению fNIRS имеет потенциал для широкого внедрения в качестве клинического и исследовательского инструмента.

В настоящее время методика fNIRS применяется как эффективный инструмент в клинических исследованиях для диагностики инсульта [2], эпилепсии [3], шизофрении [4, 5], депрессии [6]. Используется fNIRS и для нейровизуализации динамики развития мозга у детей с расстройствами аутистического спектра [7]. В последние 10 лет активно развиваются исследования по изучению взаимосвязей биоэлектрической активности и гемодинамического ответа головного мозга [8].

Вместе с тем первоначально разработанная технология fNIRS для клинического мониторинга оксигенации тканей коры головного мозга не нашла широкого применения в исследовательской практике. В отдельных работах инфракрасную спектроскопию применяли для обнаружения активации мозговой деятельности у новорожденных при воздействии слуховых стимулов и во время выполнения языковых

задач у детей [9–12]. Посредством инфракрасной спектроскопии была изучена локализация активации областей мозга в динамике поведенческого и когнитивного развития младенцев и детей [13]. Выполнена топографическая оценка паттернов мозговой активности во время патологий движения и в процессе реабилитационных мероприятий [14]. Разрабатывались схемы включения fNIRS в гибридные мультимодальные интерфейсы мозг – компьютер для оценки уровня внимания [15]. В единичных исследованиях выявлены связи стандартных показателей fNIRS с отдельными показателями электроэнцефалографии (ЭЭГ). При этом определено, что содержание HbO отрицательно, а содержание HbR положительно коррелируют с амплитудами активности ЭЭГ в альфа- (8–13 Гц) и бета-диапазонах (13–30 Гц) [16, 17]. Однако системных исследований взаимосвязей показателей fNIRS и ЭЭГ крайне мало. Отсутствуют общепринятые стандарты и интерпретация соотношений показателей fNIRS и ЭЭГ. Нет понимания возможностей совместного применения fNIRS и ЭЭГ в исследовательской практике. Вместе с тем количество работ с использованием методики fNIRS быстро растет, количество публикаций удваивается с каждым годом, что означает увеличение числа ученых и клиницистов, нуждающихся в стандартизации результатов своих исследований.

Следует признать, что мультимодальная визуализация функций мозга человека дает уникальную возможность одновременно изучать функции мозга в нескольких пространственных и временных масштабах. Одним из таких подходов является объединение ЭЭГ и функциональной спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона. Обеспечивая высокое временное разрешение при относительно скромном пространственном разрешении, ЭЭГ измеряет электрическую активность на коже головы. В свою очередь, fNIRS использует свет ближнего инфракрасного диапазона для измерения локальных изменений концен-

траций оксигемоглобина и дезоксигемоглобина, связанных с активностью мозга. Объединение данных методик в условиях мультимодального исследования позволит наблюдать за функцией мозга одновременно с двух точек зрения и, таким образом, предоставит эффективный инструмент для изучения пространственно-временных взаимосвязей между показателями биоэлектрической активности головного мозга и показателями сосудистой реакции пиллярных артерий, участвующих в обеспечении исследуемых регионов головного мозга.

Цель. Выявить связи стандартных показателей fNIRS с показателями ЭЭГ.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 100 клинически здоровых мужчин и женщин европеоидной расы, 18–25 лет, коренных жителей трех регионов Европейской части России: Архангельской области, Волгоградской области, Республики Крым. Для исследования отбирали студентов государственных вузов, воспитывавшихся в полной, социально благополучной семье, без финансовых и бытовых проблем, не имеющих хронических соматических и неврологических заболеваний. Все работы проводили анонимно в течение апреля–мая 2024 г. Соблюдались принципы Всеобщей декларации о биоэтике и правах человека: статьи 4 (благо и вред), 5 (самостоятельность и индивидуальная ответственность), 6 (согласие) и 9 (неприкосновенность частной жизни и конфиденциальность).

Для оценки гемодинамического ответа коры головного мозга в ближнем инфракрасном диапазоне использовали прибор Cortivision Poton Cap (Польша), укомплектованный 20 оптодами (10 источников и 10 детекторов) с частотой дискретизации 7,8125 Гц. Оптоды неинвазивно размещали на голове обследуемого с помощью установки в гнезда эластичной шапочки «easusap». Схема исследования включала в себя 11 этапов: фон с открытыми глазами (30") – тест «Простая зрительно-моторная реакция» (2') – тест «Сложная зрительно-моторная реакция» (2') – тест «Крепелин» (3') – закрытые глаза перед фотостимуляцией (1') – фотостимуляция 5 Гц (15") – отдых (7") – фотостимуляция 10 Гц (15") – отдых (7") – фотостимуляция 15 Гц (15") – итоговый фон (1'). Для исследования биоэлектрической активности коры головного мозга применяли программно-аппаратный комплекс «Мицар-ЭЭГ

202» (Россия). Показатели ЭЭГ регистрировали в 19 стандартных монополярных отведениях с расположением референтных электродов на мочках ушей по Международной системе отведений «10–20». Исследование проводили по стандартной схеме в положении сидя при открытых и закрытых глазах, а также в режиме фотостимуляции с частотой 5, 10 и 15 Гц. В ходе исследования оценивали абсолютные значения размаха колебаний электрического потенциала (мкВ). В работе использовали перекрывающееся расположение электродов и оптодов, проявившее в сравнительном анализе наибольшую точность получения сигналов общего происхождения в двух модальностях [18]. При этом 8 каналов были расположены с перекрытием электродов, расположенных по международной системе 10–20 в лобных, теменных, височных и затылочных регионах в левом и правом полушариях (F3 и F4; P3 и P4; T7 и T8; O1 и O2 соответственно). Еще 2 электрода были расположены для исследования префронтальной области коры с перекрытием электродов AF3 и AF4 (табл. 1).

Каждый испытуемый последовательно проходил fNIRS и электроэнцефалографическое тестирование. Функциональный статус испытуемых оценивали по уровню общей неспецифической реактивности, определяемому измерением ноцицептивной чувствительности организма [19] с применением прибора «Реакор» (Россия).

Для формирования массива первичных результатов, используемых в последующем анализе, из 100 обследованных участников были отобраны 18 испытуемых (9 мужчин и 9 женщин), характеризовавшихся высоким (3 мужчины и 3 женщины), средним (3 мужчины и 3 женщины) и низким (3 мужчины и 3 женщины) уровнем общей неспецифической реактивности организма (УОНРО). Это обеспечило равное соотношение представителей кататоксического (высокий УОНРО), комплексного (средний УОНРО) и синтаксического (низкий УОНРО) типов адаптационного процесса [20] в выборочной совокупности испытуемых.

Статистический анализ данных проводили с использованием *t*-критерия коэффициента корреляции Пирсона. Статистически значимыми считались корреляции при $p < 0,05$. Все корреляционные связи характеризовались как очень сильные (0,9–0,99) по шкале Чеддока.

Схема отведения оптодов fNIRS

Table 1

fNIRS optode lead diagram

Номер канала	Тип датчика	Соответствие датчика отведениям ЭЭГ	Место съема
1	Источник	F4	Правая лобная кора
	Детектор	F6	
2	Источник	F3	Левая лобная кора
	Детектор	F5	
3	Источник	AF4	Правая лобная кора
	Детектор	AFp2	
4	Источник	AF3	Левая лобная кора
	Детектор	AFp1	
5	Источник	FTT8h	Правая височная кора
	Детектор	T8	
6	Источник	FTT7h	Левая височная кора
	Детектор	T7	
7	Источник	P3	Левая теменная кора
	Детектор	CPP5h	
8	Источник	P4	Правая теменная кора
	Детектор	CPP6h	
9	Источник	O2	Левая затылочная кора
	Детектор	OL2h	
10	Источник	O1	Правая затылочная кора
	Детектор	OL1h	

Результаты. В ходе корреляционного анализа среднеарифметических значений показателей HbO, HbR и сигнала ЭЭГ были получены следующие статистически значимые результаты.

На этапе съема фоновых показателей выявлены множественные прямые сильные корреляции электрического потенциала ЭЭГ с показателем HbO и обратные сильные связи с показателем HbR (рис. 1, 2).

На этапе съема показателей с закрытыми глазами перед фотостимуляцией также были обнаружены множественные прямые сильные корреляции электрического потенциала ЭЭГ с показателями HbO и обратные сильные связи с показателем HbR (рис. 3, 4).

На этапе фотостимуляции с частотой 5 Гц наблюдали обратную связь относительно этапов съема фоновых показателей и съема показателей с закрытыми глазами перед началом фото-

стимуляции. Обнаружено множество обратных сильных корреляций электрического потенциала ЭЭГ с показателем HbO и прямых сильных корреляций с показателем HbR (рис. 5, 6).

Этап фотостимуляции с частотой 10 Гц характеризовался минимальным количеством корреляций: 2 прямые сильные корреляции электрического потенциала ЭЭГ с показателем HbO и 5 сильных обратных корреляций с показателем HbR (рис. 7, 8).

На этапе фотостимуляции с частотой 15 Гц были обнаружены обратные сильные корреляционные связи электрического потенциала ЭЭГ с показателем HbO и прямые сильные корреляции с показателем HbR (рис. 9, 10).

Обсуждение. Результаты выполненного исследования демонстрируют ряд корреляционных связей, которые потенциально могут отражать физиологические закономерности, существующие на уровне головного мозга и ох-

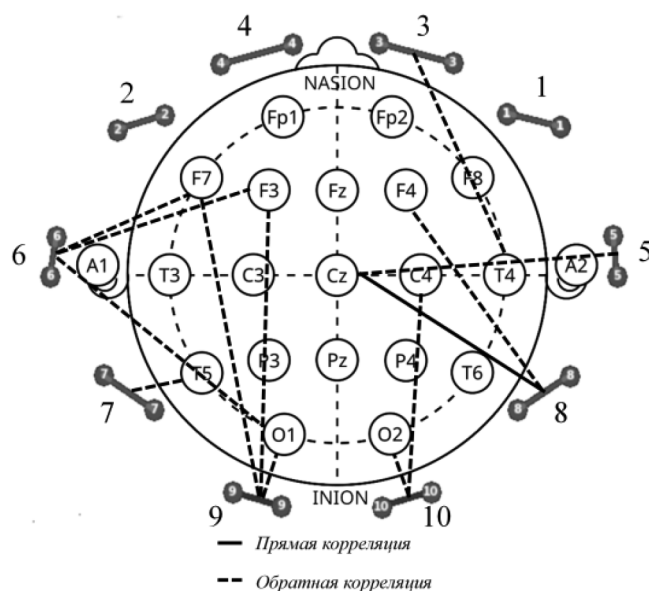
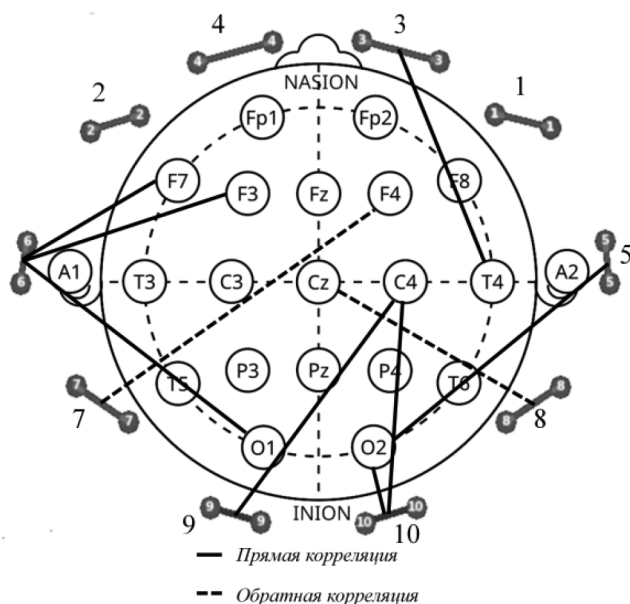


Рис. 1. Корреляционные связи между показателями HbO по каналам fNIRS и значениями амплитуды ЭЭГ на этапе фона

Рис. 2. Корреляционные связи между показателями HbR по каналам fNIRS и значениями амплитуды ЭЭГ на этапе фона

Fig. 1. Correlations between HbO indicators via fNIRS channels and EEG amplitude values at the background stage

Fig. 2. Correlations between HbR values via fNIRS channels and EEG amplitude values at the background stage

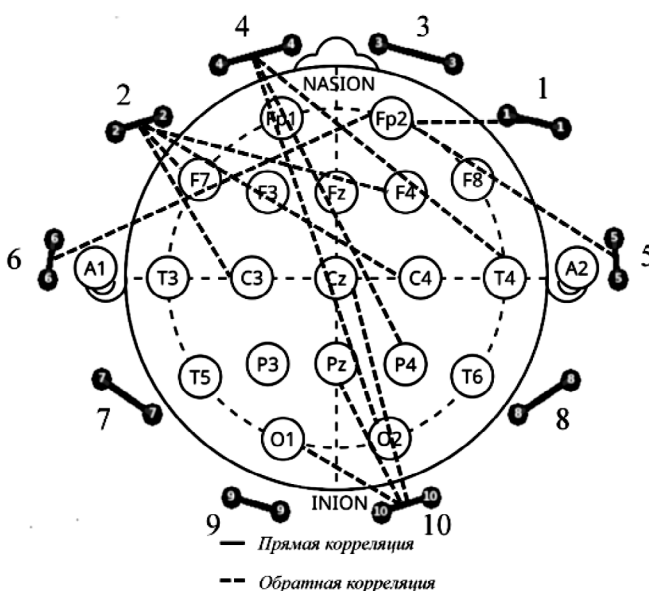
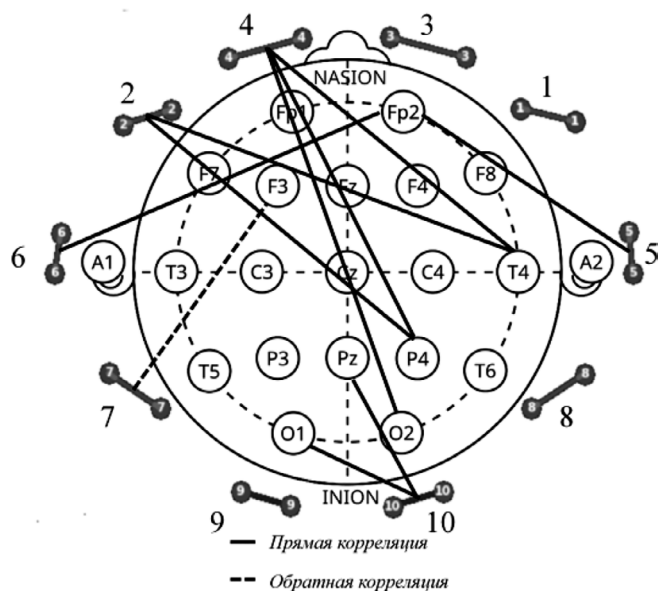


Рис. 3. Корреляционные связи между показателем HbO по каналам fNIRS и значениями амплитуды ЭЭГ на этапе закрытых глаз перед фотостимуляцией

Рис. 4. Корреляционные связи между показателем HbR по каналам fNIRS и значениями амплитуды ЭЭГ на этапе закрытых глаз перед фотостимуляцией

Fig. 3. Correlations between the HbO indicator via fNIRS channels and the values of the EEG amplitude at the stage of closed eyes before photostimulation

Fig. 4. Correlations between the HbR index via fNIRS channels and the values of the EEG amplitude at the stage of closed eyes before photostimulation

ватывающие процессы метаболизма и электрической активности его основных ритмогенных структур. Концентрация оксигенированного и

восстановленного гемоглобина, которая регистрируется датчиками fNIRS, является наиболее значимым маркером потребления кислоро-

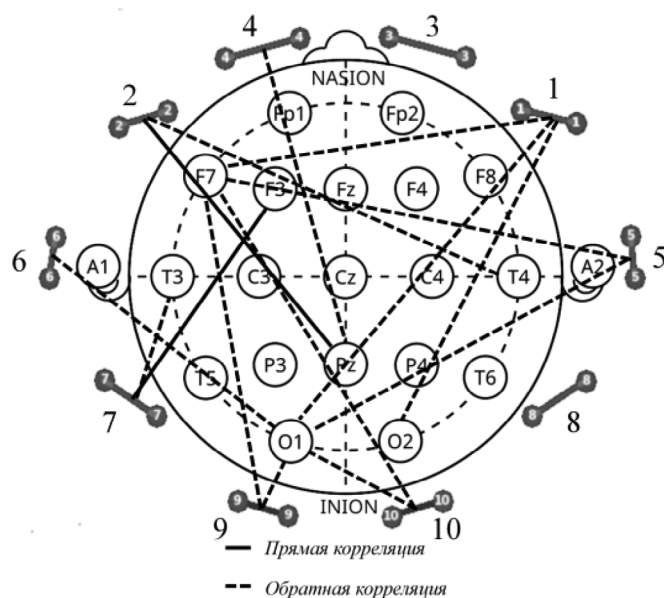


Рис. 5. Корреляционные связи между показателем HbO по каналам fNIRS и значениями амплитуды ЭЭГ на этапе фотостимуляции с частотой 5 Гц
Fig. 5. Correlations between the HbO indicator via fNIRS channels and the values of the EEG amplitude at the stage of photostimulation with a frequency of 5 Hz

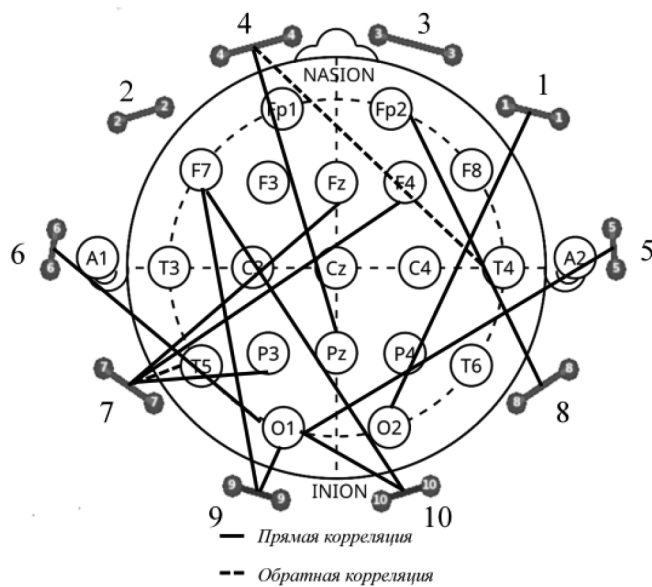


Рис. 6. Корреляционные связи между показателем HbR по каналам fNIRS и значениями амплитуды ЭЭГ на этапе фотостимуляции с частотой 5 Гц
Fig. 6. Correlations between the HbR index via fNIRS channels and the values of the EEG amplitude at the stage of photostimulation with a frequency of 5 Hz

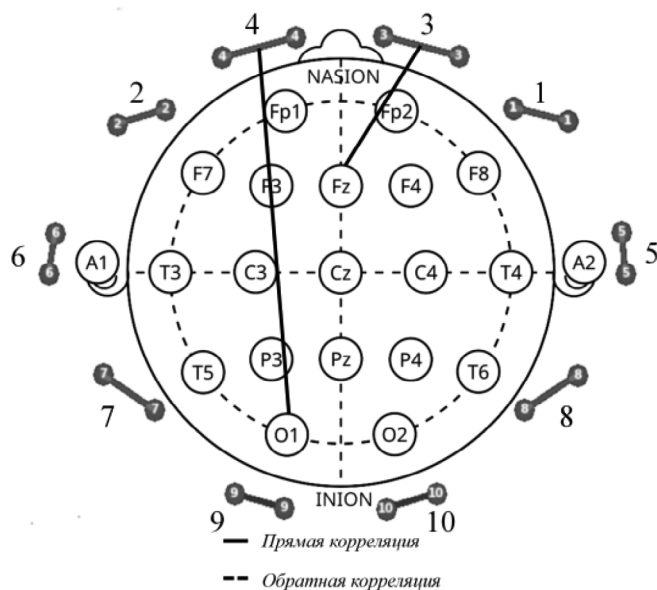


Рис. 7. Корреляционные связи между показателем HbO по каналам fNIRS и значениями амплитуды ЭЭГ на этапе фотостимуляции с частотой 10 Гц
Fig. 7. Correlations between the HbO indicator via fNIRS channels and the values of the EEG amplitude at the stage of photostimulation with a frequency of 10 Hz

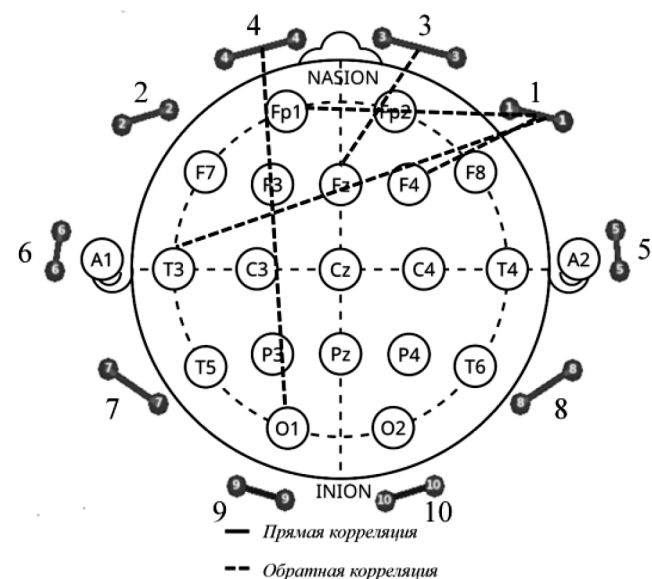


Рис. 8. Корреляционные связи между показателем HbR по каналам fNIRS и значениями амплитуды ЭЭГ на этапе фотостимуляции с частотой 10 Гц
Fig. 8. Correlations between the HbR index via fNIRS channels and the values of the EEG amplitude at the stage of photostimulation with a frequency of 10 Hz

да активно функционирующими тканями, в то время как колебания биоэлектрического потенциала, фиксируемого на ЭЭГ, представляют собой объективный показатель уровня возбуждения нейронных структур головного мозга.

Представленные результаты подтверждают, что между показателями различных фракций гемоглобина (HbO и HbR) и их связями с электрическим потенциалом ЭЭГ в основном прослеживается обратная зависимость:

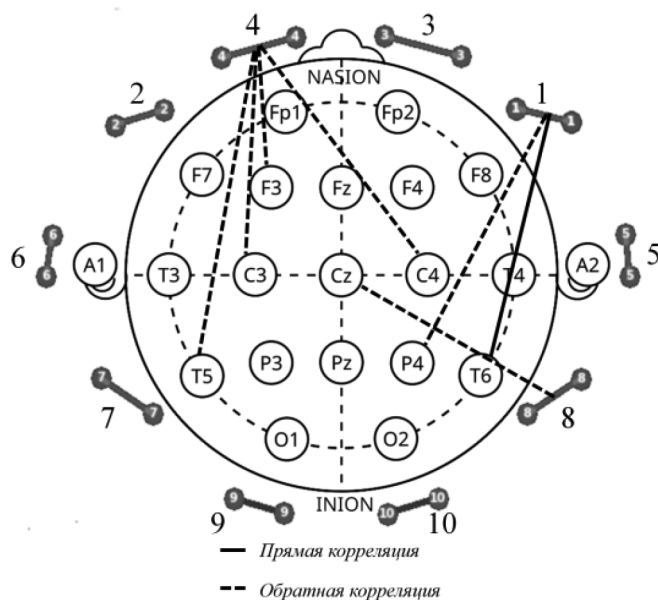


Рис. 9. Корреляционные связи между показателем HbO по каналам fNIRS и значениями амплитуды ЭЭГ на этапе фотостимуляции с частотой 15 Гц
Fig. 9. Correlations between the HbO indicator via fNIRS channels and the values of the EEG amplitude at the stage of photostimulation with a frequency of 15 Hz

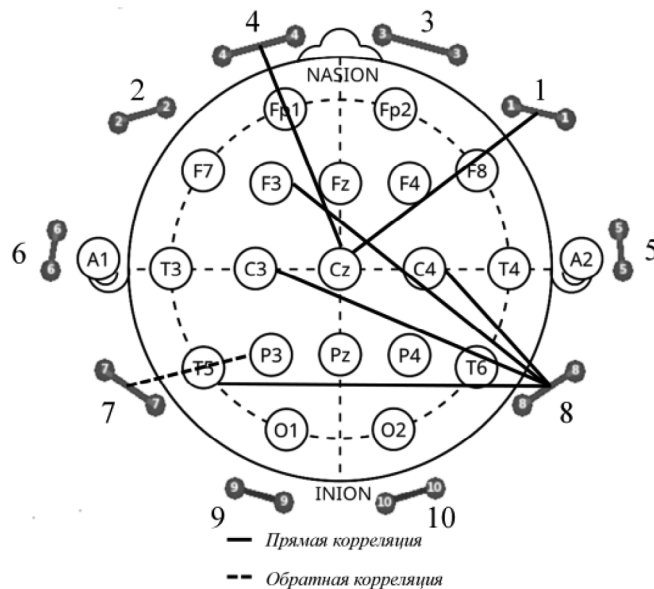


Рис. 10. Корреляционные связи между показателем HbR по каналам fNIRS и значениями амплитуды ЭЭГ на этапе фотостимуляции с частотой 15 Гц
Fig. 10. Correlations between the HbR index via fNIRS channels and the values of the EEG amplitude at the stage of photostimulation with a frequency of 15 Hz

во всех проанализированных функциональных пробах положительные корреляции с одной из фракций во многом повторяются в картине корреляций с другой фракцией, но с противоположным знаком. Такое наблюдение является вполне закономерным, поскольку насыщение крови кислородом ограничено общим содержанием гемоглобина в ее эритроцитах, а сами по себе концентрации оксигенированного и восстановленного гемоглобина находятся в отрицательной функциональной взаимосвязи друг с другом. Ткани с высоким уровнем метаболизма способствуют очень быстрому переходу кислорода из крови в межклеточное вещество и клетки, за счет чего в эритроцитах растет доля восстановленной формы гемоглобина (HbR) и снижается доля оксигенированной (HbO).

Исходя из этого, необходимо отметить тот факт, что электрическая активность головного мозга в состоянии покоя (фон с открытыми глазами и с закрытыми глазами перед фотостимуляцией) имеет положительные корреляционные связи с концентрацией HbO и обратные – с концентрацией HbR. То есть более высокое содержание кислорода в кровеносных сосудах головного мозга прямо коррелирует с более высокой амплитудой его электрической

активности. Учитывая, что состояние покоя на ЭЭГ характеризуется доминированием относительно высокоамплитудной и низкочастотной альфа-активности, такого рода связи кажутся вполне логичными. Можно предположить, что переход головного мозга в состояние спокойного бодрствования и режим ожидания стимуляции, который сопровождается замедлением общей ритмики на ЭЭГ и ростом ее абсолютной амплитуды, связан с общим уменьшением активности нейронных ансамблей, что выражается в снижении уровня метаболизма и потребления кислорода тканями. В такой ситуации большая доля гемоглобина остается в оксигенированной форме, а доля HbR оказывается относительно мала.

Примечательно, что обе проанализированные ситуации покоя: фоновая проба с открытыми глазами и проба с закрытыми глазами перед фотостимуляцией, которая следовала сразу после выполнения нескольких тестов (простая и сложная зрительно-моторная реакция, Крепелин), практически не отличаются по количеству обнаруженных статистически значимых связей и их соотношению между собой (прямые – обратные), однако имеют значительные различия в локализации обнаруженных корреля-

ций. Так, в ситуации перед фотостимуляцией наблюдается большое количество связей с показателями fNIRS в лобных отделах головного мозга, что не было отмечено в фоновой пробе. Такие перестройки могут объясняться тем, что выполнение когнитивных тестов до пробы с фотостимуляцией требовало от участников подключения ресурсов селективного внимания и рабочей памяти, то есть активации тех функций, чья работа традиционно связывается с активностью лобной коры больших полушарий.

Фотостимуляция на частотах 5, 10 и 15 Гц привела к изменению картины корреляционных связей между показателями fNIRS и ЭЭГ. Это касается как количества, так и характера обнаруженных статистически значимых корреляций. Наименьшее количество связей отмечали при стимуляции на частоте 10 Гц, при этом сохранялась общая выявленная закономерность: концентрация HbO прямо коррелировала с амплитудой ЭЭГ, а концентрация HbR – наоборот. С точки зрения функционирования ритмогенных структур головного мозга, фотостимуляция на частоте 10 Гц является наиболее нейтральной, поскольку совпадает с доминирующим ритмом покоя взрослого человека (альфа-ритм с частотой 10 ± 1 Гц). Таким образом, можно предположить, что навязывание внешнего ритма с частотой, близкой к естественным частотам ритмогенных структур, вызывает снижение жесткости взаимосвязей между электрической активностью головного мозга и его обеспеченностью кислородом.

В то же время стимуляция на частотах 5 и 15 Гц приводила к резким перестройкам в структуре корреляций. Это выразилось не только в количестве статистически значимых связей, но и в их характере. В обоих случаях наблюдалась инверсия типичной картины: прямые корреля-

ции с амплитудой ЭЭГ были установлены для концентрации HbR, обратные – для концентрации HbO. При этом максимальное количество значимых связей было зарегистрировано в ситуации стимуляции на низкой частоте (5 Гц). Такие кардинальные изменения в структуре связей могут быть отражением сопротивления ритмогенных структур головного мозга навязыванию неестественной для состояния бодрствования внешней ритмики. В этих условиях для поддержания нормальной по частоте и амплитуде электрической активности, по всей видимости, возрастает нагрузка на нейронные сети головного мозга, что и находит свое отражение в увеличении количества связей. Интересно, что при стимуляции на частоте 15 Гц не возникает такой жесткой структуры корреляций, поскольку высокочастотная ритмика головного мозга является более естественной для состояния активного бодрствования здорового взрослого человека.

Заключение. В результате предпринятого исследования выявлены связи показателей fNIRS с показателями ЭЭГ. При этом обоснована схема отведения оптодов fNIRS, оптимально соотношенная со схемой расположения электродов ЭЭГ по международной системе 10–20 в лобных, теменных, височных и затылочных регионах в левом и правом полушариях (F3 и F4; P3 и P4; T7 и T8; O1 и O2 соответственно), а также в префронтальной области коры с перекрытием электродов AF3 и AF4. Конкретизированы и сопоставлены типы fNIRS и ЭЭГ-реагирования на фотостимуляцию в 5, 10 и 15 Гц. Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего изучения взаимосвязей fNIRS и показателей ЭЭГ, обеспечивающих возможность мультимодальной визуализации функций мозга в условиях эксперимента и клинической практики.

Сведения об авторах:

Мулик Александр Борисович – доктор биологических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела медико-психологического сопровождения научно-исследовательского центра, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; ORCID: 0000-0001-6472-839X; e-mail: mulik-ab@mail.ru

Улесикова Ирина Владимировна – кандидат биологических наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела обитаемости научно-исследовательского центра, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; ORCID: 0000-0001-9284-3280; e-mail: ulesikovairina@mail.ru

Моисеев Даниил Вячеславович – младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела медико-психологического сопровождения научно-исследовательского центра, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; ORCID: 0000-0002-3509-898X; e-mail: da.vya.moiseev@mail.ru

Шатыр Юлия Александровна – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела медико-биологических исследований Научно-исследовательского центра, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; ORCID: 0000-0001-9279-5282; e-mail: yuliashatyr@gmail.com

Кунавин Михаил Алексеевич – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии человека и биотехнических систем, Северный (Арктический) федеральный университет; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; ORCID: 0000-0001-7948-1043; e-mail: m.kunavin@narfu.ru

Долецкий Алексей Николаевич – доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры нормальной физиологии Волгоградского государственного медицинского университета; 400066, Волгоград, пл. Павших Борцов, д. 1; ORCID: 0000-0001-6191-3901; e-mail: andoletsky@gmail.com

Information about the authors:

Alexandr B. Mulik – Dr. of Sci. (Biol.), Professor, Senior Researcher at the Research Department of Medical and Psychological Support of the Research Center, Military Medical Academy; 194044, St. Petersburg, Academician Lebedev Street, 6; ORCID: 0000-0001-6472-839X; e-mail: mulik-ab@mail.ru

Irina V. Ulesikova – Cand. of Sci. (Biol.), Researcher at the Department of Habitability of the Research Center, Military Medical Academy; 194044, St. Petersburg, Academician Lebedev Street, 6; ORCID: 0000-0001-9284-3280; e-mail: ulesikovairina@mail.ru

Daniil V. Moiseev – Junior Researcher at the Research Department of Medical and Psychological Support of the Research Center, Military Medical Academy; 194044, St. Petersburg, Academician Lebedev Street, 6; ORCID: 0000-0002-3509-898X; e-mail: da.vya.moiseev@mail.ru

Yulia A. Shatyr – Cand. of Sci. (Biol.), Associate Professor, Senior Researcher at the Research Department of Medical and Biological Research of the Research Center, Military Medical Academy; 194044, St. Petersburg, Academician Lebedev Street, 6; ORCID: 0000-0001-9279-5282; e-mail: yuliashatyr@gmail.com

Mikhail A. Kunavin – Cand. of Sci. (Biol.), Associate Professor at the Department of Human Biology and Biotechnical Systems of the Northern (Arctic) Federal University, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Qy, 17; ORCID: 0000-0001-7948-1043; e-mail: m.kunavin@narfu.ru

Alexey N. Doletsky – Dr. of Sci. (Biol.), Professor, Professor at the Department of Normal Physiology, Volgograd State Medical University; 400066, Volgograd, Fallen Fighters Sq., 1; ORCID: 0000-0001-6191-3901; e-mail: andoletsky@gmail.com

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Наибольший вклад распределен следующим образом. Вклад в концепцию и план исследования — А. Б. Мулик. Вклад в сбор данных — И. В. Улесикова, М. А. Кунавин, А. Н. Долецкий, Д. В. Моисеев. Вклад в анализ данных и выводы — А. Б. Мулик, А. Н. Долецкий, М. А. Кунавин, Д. В. Моисеев. Вклад в подготовку рукописи — А. Б. Мулик, Ю. А. Шатыр, А. Н. Долецкий, М. А. Кунавин, И. В. Улесикова, Д. В. Моисеев.

Author contribution. All authors equally participated in the preparation of the article in accordance with the ICMJE criteria.

Special contribution: ABM contribution to the concept and plan of the study. IVU, MAK, AND, DVM contribution to data collection. ABM, AND, MAK, DVM contribution to data analysis and conclusions. ABM, YuASh, AND, MAK, IVU, DVM contribution to the preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure. The authors declare that they have no competing interests.

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации проекта «Прогнозирование рисков развития агрессивного, суицидального и аддиктивного поведения среди населения территорий с различным физико-географическим и биогеохимическим статусом» по программе академического стратегического лидерства «Приоритет – 2030».

Financing. The work was carried out as part of the project “Forecasting the risks of developing aggressive, suicidal and addictive behavior among the population of territories with different physical-geographical and biogeochemical status” under the academic strategic leadership program “Priority – 2030”.

Поступила/Received: 28.07.2024

Принята к печати/Accepted: 15.12.2024

Опубликована/Published: 30.12.2024

ЛИТЕРАТУРА/REFERENTS

1. Ferrari M., Quaresima V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application. *Neuroimage*, 2012, Vol. 63, No. 2, pp. 921-935. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.03.049.
2. Lamberti N., Manfredini F., Piva G., et al. Cortical oxygenation during a motor task to evaluate recovery in subacute stroke patients: a study with near-infrared spectroscopy. *Neurol Int*, 2022, Vol. 14(2), P. 322-335. doi: 10.3390/neurolint14020026.
3. Tung H., Lio WH., Lan TH., et al. Network reorganization during verbal fluency task in fronto-temporal epilepsy: A functional near-infrared spectroscopy study. *J. Psychiatr Res*, 2021, Vol. 138, pp. 541-549. doi: 10.1016/j.jpsychires.2021.05.012.
4. Kumar V., Shivakumar V., Chhabra H., et al. Functional near infra-red spectroscopy (fNIRS) in schizophrenia: A review. *Asian J Psychiatr*, 2017, Vol. 27, pp. 18-31. doi: 10.1016/j.ajp.
5. Yeung M. K. An optical window into brain function in children and adolescents: A systematic review of functional near-infrared spectroscopy studies. *Neuroimage*, 2021, Vol. 227: pp. 117672. doi: 10.1016/j.neuroimage.2020.117672.

6. Lang X., Wen D., Li Q., et al. fNIRS Evaluation of frontal and temporal cortex activation by verbal fluency task and high-level cognition task for detecting anxiety and depression, *Front Psychiatry*, 2021, Vol. 12, pp. 18–21. doi: 10.3389/fpsy.2021.690121.
7. Liu T., Liu X., Yi L., et al. Assessing autism at its social and developmental roots: A review of Autism Spectrum Disorder studies using functional near-infrared spectroscopy. *Neuroimage*, 2019, Vol. 185, pp. 955–967. doi: 10.1016/j.neuroimage.2017.09.044.
8. Li R., Yang D., Fang F., et al. Concurrent fNIRS and EEG for Brain Function Investigation: A Systematic, Methodology-Focused Review. *Sensors*, 2022, Vol. 22(15): pp. 5865. doi:10.3390/s22155865.
9. Pena M., Maki A., Kovacic D., et al. Sounds and silence: an optical topography study of language recognition at birth. *Proc natl acad sci USA*, 2003, Vol. 100(20), pp. 11702–11705 doi: 10.1073/pnas.1934290100.
10. Grossmann T., Oderecker R., Koch S. P., Friederici A. D. The developmental origins of voice processing in the human brain. *Neuron*, 2010, Vol. 65(6), pp. 852–858. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.03.001>.
11. Chen S., Sakatani K., Lichty W., et al. Auditory-evoked cerebral oxygenation changes in hypoxic-ischemic encephalopathy of newborn infants monitored by near infrared spectroscopy. *Early hum dev*, 2002, Vol. 67(1-2), pp. 113–121. doi: [https://doi.org/10.1016/s0378-3782\(02\)00004-x](https://doi.org/10.1016/s0378-3782(02)00004-x).
12. Watanabe E., Maki A., Kawaguchi F., et al. Non-invasive assessment of language dominance with near-infrared spectroscopic mapping. *Neurosci Lett*, 1998, Vol. 256 (1), pp. 49–52. doi: [https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(98\)00754-x](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(98)00754-x).
13. Lloyd-Fox S., Blasi A., Elwell C. E. Illuminating the developing: The past, present and future of functional near infrared spectroscopy. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 2010, Vol. 34, No. 3, pp. 269–284. doi: 10.1016/j.neubiorev.2009.07.008.
14. Бадарина А. А., Грубова В. В., Андреева А. В. и др. Гемодинамический ответ в моторной коре на выполнение различных типов движения // *Известия вузов. ПНД*. 2022. Т. 30, № 1. С. 96–108. doi: 10.18500/0869-6632-2022-30-1-96-108 [Badarina A. A., Grubova V. V., Andreeva A. V., et al. Hemodynamic response in the motor cortex to performing various types of movement. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2022, Vol. 30, № 1, pp. 96–108. doi: 10.18500/0869-6632-2022-30-1-96-108 (In Russ.)].
15. Talamonti D., Montgomery C. A., Clark D. P. A., Bruno D. Age-related prefrontal cortex activation in associative memory: An fNIRSpilt study. *Neuroimage*, 2020, Vol. 222, pp. 117223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117223>.
16. Lachert P., Janusek D., Pulawski P., et al. Coupling of oxy- and deoxyhemoglobin concentrations with EEG rhythms during motor task. *Scientific reports*, 2017, Vol. 7(1), pp. 15414. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15770-2.0905>.
17. Leff D. R., Orihuela-Espina F., Elwell C. E., Athanasiou T., et al. Assessment of the cerebral cortex during motor task behaviours in adults: A systematic review of functional near infrared spectroscopy (fNIRS) studies. *Neuroimage*, 2011, Vol. 54, № 4, pp. 2922–2936. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.058>.
18. Zhu L., Haddad A., Zeng T., et al. How to Co-Position EEG Electrodes and fNIRS Optodes in Multi-Modal Functional Brain Imaging Experiments? *Conference: fNIRS*, 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.31508.55685.
19. Мулик А. Б., Шатыр Ю. А., Улесикова И. В., Назаров Н. О. Оценка общей неспецифической реактивности организма человека. *СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений*, 2023, 8 с. [Mulik A. B., Shatyr Yu. A., Ulesikova I. V., Nazarov N. O. Assessment of the general nonspecific reactivity of the human body. St. Petersburg: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, 2023, P. 8 (In Russ.)]
20. Шатыр Ю. А., Булатецкий С. В., Улесикова И. В. и др. Типологизация системной адаптации организма человека. *Российский медико-биологический вестник им. Академика И.П. Павлова*, 2017, Т. 25, № 3, С. 362–372. doi:10.23888/PAVLOVJ20173362-372 [Shatyr Yu. A., Bulatetskiy S. V., Ulesikova I. V., et al. Typologization of the systemic adaptation of the human body. *I. P. Pavlov Russian medical biological herald*, 2017, Vol. 25, № 3, pp. 362–372. doi:10.23888/PAVLOVJ20173362-372 (In Russ.)].