DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643398 EDN: EQNEBN

Результаты оценки стандартных показателей функциональной спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона у молодых людей, проживающих в различных регионах европейской части России

А.Б. Мулик[1], И.В. Улесикова[1], Н.О. Назаров[2], М.А. Кунавин[3], А.Г. Соловьёв[4], Ю.А. Шатыр[1]

[1] Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия;
[2] Центр внедрения изменений Министерства здравоохранения Московской области, Красногорск, Россия;
[3] Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия;
[4] Северный государственный медицинский университет, Архангельск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В последние годы появляются многочисленные попытки соотнесения результатов функциональной спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона (fNIRS), полученных разными авторами с использованием различной приборной базы. Для достижения консенсуса в нормировании показателей fNIRS, интерпретации и воспроизведения экспериментальных данных требуется сравнительная оценка этих показателей в группах здоровых людей — жителей различных природно-климатических зон.

Цель. Охарактеризовать проявление стандартных показателей fNIRS у молодых людей, проживающих в различных условиях среды жизнедеятельности.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 100 клинически здоровых мужчин и женщин европеоидной расы 18–25 лет, коренных жителей трёх регионов европейской части России: Архангельской, Волгоградской областей и Республики Крым. Для оценки гемодинамического ответа коры головного мозга в ближнем инфракрасном диапазоне применяли прибор Cortivision Poton Cap C20 (Cortivision, Польша). Схема исследования включала в себя 3 этапа: 1-й этап — фон fNIRS с открытыми глазами (30′); 2-й этап — предъявление теста «Простая зрительно-моторная реакция» (2′) + предъявление теста «Сложная зрительно-моторная реакция» (2′) + предъявление теста «Крепелин» (3′); 3-й этап — постнагрузочные значения fNIRS с открытыми глазами (1′). Для последующего анализа данных учитывали среднеарифметические значения показателей концентрации оксигенированного и деоксигенированного гемоглобина (ммоль/л) на этапе фона и постнагрузочных значений fNIRS.

Результаты. Сравнительный анализ региональной выраженности фоновых и постнагрузочных значений показателей fNIRS не выявил статистически значимых различий между представителями населения модельных регионов, характеризующихся существенным перепадом уровня комфортности среды обитания (Архангельская область — 6 баллов, Волгоградская область — 17 баллов, Республика Крым — 25 баллов). Вместе с тем наглядно проявляются различия фоновой выраженности показателей fNIRS между выборочной совокупностью мужчин и выборочной совокупностью женщин, участвовавших в исследовании. Выявлена повторяемость однонаправленных отличий между мужчинами и женщинами, обнаруженных в фоновых значениях оксигенированного и деоксигенированного гемоглобина в одних и тех же областях коры головного мозга. В обоих случаях статистически значимые различия концентраций были определены в симметричных лобных (AF4-AFp2, AF3-AFp1) и височных (FTT8-T8, FTT7-T7) отведениях. У женщин зарегистрированы более высокие значения показателей в лобных отделах коры больших полушарий, а у мужчин, наоборот, концентрации изучаемых форм гемоглобина были выше в височных отделах.

Заключение. Охарактеризованы проявления стандартных показателей fNIRS у молодых людей, проживающих в различных условиях среды жизнедеятельности. Представленные данные будут способствовать повышению надёжности и воспроизводимости результатов исследований, выполненных с использованием технологии fNIRS, и тем самым стимулировать внедрение передовых методов нейровизуализации функций мозга в исследовательскую деятельность и клиническую практику.

Ключевые слова: сосудисто-нервная связь; функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия; fNIRS; половые различия показателей fNIRS.

Как цитировать:
Мулик А.Б., Улесикова И.В., Назаров Н.О., Кунавин М.А. Соловьёв А.Г., Шатыр Ю.А. Результаты оценки стандартных показателей функциональной спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона у молодых людей, проживающих в различных регионах европейской части России // Экология человека. 2024. Т. 31, № 11. С. 807–818. DOI: 10.17816/humeco643398 EDN: EQNEBN

Рукопись поступила: 25.12.2024 **Рукопись одобрена:** 07.04.2025 **Опубликована online:** 29.05.2025

ЭКО • ВЕКТОР

Распространяется на условиях лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2024

DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643398 EDN: EQNEBN

Standard Functional Near-Infrared Spectroscopy Parameters in Young Adults Living in Different Regions of European Russia

Aleksandr B. Mulik[1], Irina V. Ulesikova[1], Nikita O. Nazarov[2], Mikhail A. Kunavin[3], Andrey G. Soloviev[4], Yulia A. Shatyr[1]

[1] Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia;
[2] Change Implementation Center of the Ministry of Health of the Moscow Region, Krasnogorsk, Russia;
[3] Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia;
[4] Northern State Medical University, Arkhangelsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: In recent years, numerous studies have attempted to compare the results of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) obtained by different authors using various devices. To reach a consensus on standardizing fNIRS parameters, interpreting data, and ensuring reproducibility, comparative assessments of these parameters in healthy individuals from different geographical and climatic regions are needed.

AIM: To characterize standard fNIRS parameters in young adults living in various environmental conditions.

MATERIALS AND METHODS: The study included 100 clinically healthy Caucasian men and women aged 18–25 years, all native residents of three regions in European Russia: Arkhangelsk Oblast, Volgograd Oblast, and the Republic of Crimea. Hemodynamic responses of the cerebral cortex in the near-infrared range were assessed using the Cortivision Poton Cap C20 device (Cortivision, Poland). The experimental protocol consisted of three stages: Stage 1: baseline fNIRS recording with eyes open (30′); Stage 2: administration of the following tasks: Simple Visual-Motor Reaction (2′), Complex Visual-Motor Reaction (2′), and Kraepelin Test (3′); Stage 3: post-task fNIRS recording with eyes open (1′). For subsequent data analysis, mean fNIRS values of HbO and HbR concentrations (mmol/L) were used for both the baseline and post-task stages.

RESULTS: Comparative analysis of regional differences in baseline and post-task fNIRS values revealed no statistically significant differences between participants from the modeled regions, which varied considerably in environmental comfort scores (6 points for Arkhangelsk Oblast, 17 points for Volgograd Oblast, 25 points for the Republic of Crimea). At the same time, clear differences in the baseline expression of fNIRS parameters were observed between the sampled groups of male and female participants. Repeatedly observed unidirectional differences in baseline HbO and HbR concentrations between male and female participants were identified in the same cortical areas. In both cases, statistically significant differences in concentrations were identified in symmetrical frontal (AF4–AFp2, AF3–AFp1) and temporal (FTT8–T8, FTT7–T7) leads. In women, higher values were recorded in the frontal cortex, whereas in men, the concentrations of the studied forms of hemoglobin were higher in the temporal regions.

CONCLUSION: The study characterized standard fNIRS parameters in young adults residing in varied environmental conditions. The presented data will contribute to improving the reliability and reproducibility of studies conducted using fNIRS technology, thereby facilitating the implementation of advanced neuroimaging methods in both research and clinical practice.

Keywords: neurovascular coupling; functional near-infrared spectroscopy; fNIRS; sex differences in fNIRS parameters.

To cite this article:
Mulik AB, Ulesikova IV, Nazarov NO, Kunavin MA, Soloviev AG, Shatyr YuA. Standard functional near-infrared spectroscopy parameters in young adults living in different regions of European Russia. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology).* 2024;31(11):807–818. DOI: 10.17816/humeco643398 EDN: EQNEBN

Received: 25.12.2024 **Accepted:** 07.04.2025 **Published online:** 29.05.2025

ECO•VECTOR
The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2024

DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643398 EDN: EQNEBN

居住在俄罗斯欧洲部分不同地区的青年标准功能性近红外光谱指标评估结果

Aleksandr B. Mulik[1], Irina V. Ulesikova[1], Nikita O. Nazarov[2], Mikhail A. Kunavin[3], Andrey G. Soloviev[4], Yulia A. Shatyr[1]

[1] Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia;
[2] Change Implementation Center of the Ministry of Health of the Moscow Region, Krasnogorsk, Russia;
[3] Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia;
[4] Northern State Medical University, Arkhangelsk, Russia

摘要

论证。近年来，越来越多研究尝试比较不同研究者使用不同仪器设备所获得的功能性近红外光谱（functional near-infrared spectroscopy，fNIRS）结果。为实现fNIRS指标的标准化、结果解释和实验数据的可重复性，有必要在生活于不同自然气候区域的健康人群中开展比较性评估。

目的。描述生活在不同环境条件下青年的标准 fNIRS 指标表现。

材料与方法。研究共纳入100名18－25岁、临床健康的欧洲人种男性与女性，分别为俄罗斯欧洲部分Archangelsk 州、Volgograd州和Republic of Crimea的原住居民。使用Cortivision Photon Cap C20仪器（Cortivision，波兰）记录大脑皮层在近红外光谱范围内的血流动力学反应。研究设计包括三阶段：第一阶段为睁眼基础状态（30秒）；第二阶段依次进行“简单视动反应”（2分钟），“复杂视动反应”（2分钟）和“Kraepelin测试”（3分钟）；第三阶段为睁眼负荷后状态（1分钟）。在后续数据分析中，纳入了基础阶段和负荷后阶段fNIRS中HbO与HbR浓度（mmol/L）指标的平均值。

结果。对模型地区人群 fNIRS 指标基础阶段与负荷后阶段的区域表达强度进行比较分析，结果显示在居住环境舒适度显著差异的地区（Volgograd州 — 6分，Volgograd州 — 17分，Republic of Crimea — 25分）之间无统计学显著差异。同时，参与研究的男性与女性样本在fNIRS指标的基础阶段表达水平上表现出明显差异。在HbO和HbR的基础期数值中，男性与女性在大脑皮层相同区域表现出方向一致的重复性差异。在这两种情况下，均在左右对称的额叶导联（AF4-AFp2、AF3-AFp1）和颞叶导联（FTT8-T8、FTT7-T7）中检测到浓度的统计学显著差异。女性在大脑皮层额叶区域的相关指标更高，而男性则在颞叶区域表现出更高的血红蛋白浓度。

结论。本研究描述了生活在不同环境条件下青年群体的标准fNIRS指标特征。该数据有助于提升采用fNIRS技术的研究结果的可靠性和可重复性，从而推动先进脑功能神经成像方法在科研与临床实践中的应用。

关键词：神经-血管耦合；功能性近红外光谱；fNIRS；性别差异fNIRS指标。

引用本文：
Mulik AB, Ulesikova IV, Nazarov NO, Kunavin MA, Soloviev AG, Shatyr YuA. 居住在俄罗斯欧洲部分不同地区的青年标准功能性近红外光谱指标评估结果. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology).* 2024;31(11):807–818. DOI: 10.17816/humeco643398 EDN: EQNEBN

收到: 25.12.2024 **接受:** 07.04.2025 **发布日期:** 29.05.2025

ECO•VECTOR
The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2024

ОБОСНОВАНИЕ

Функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия (functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS) — неинвазивная, простая в использовании методика визуализации уровня оксигенации кортикальных отделов головного мозга, позволяющая изучать их нормальную работу и нарастающие патологические изменения в условиях реальной жизнедеятельности [1]. Посредством применения пар оптодов (излучателя и детектора света) осуществляется спектроскопия различных участков головного мозга. Изменения в количестве рассеянного света, фиксируемого детектором, соответствуют изменениям оптических свойств ткани в рабочей зоне 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 отражённом виде, достигая детектора, характеризовать концентрацию оксигенированного (HbO) и деоксигенированного (HbR) гемоглобина в тканях мозга.

Количество исследований в этой области за последние десятилетия резко возросло параллельно с ростом доступности коммерческих систем fNIRS. В связи с этим появляются многочисленные попытки соотнесения результатов fNIRS, полученных разными авторами с использованием различной приборной базы, что усложняет интерпретацию и воспроизведение экспериментальных данных [2]. Для достижения консенсуса в нормировании показателей fNIRS требуется их сравнительная оценка в группах здоровых людей, проживающих в различных условиях внешней среды. Наиболее актуальным является изучение выраженности стандартных показателей fNIRS в зависимости от географической широтной зональности места жительства, более всего отражающей природную комфортность жизнедеятельности человека. Результаты ряда исследований свидетельствуют о влиянии различных, в том числе социальных, факторов окружающей среды на структурные и функциональные свойства головного мозга [3, 4]. Отмечается положительное влияние эстетичности природной среды и негативное — экстремальных погодных условий на функциональное состояние центральной нервной системы [5]. Определена роль комфортности и эстетичности среды обитания в становлении фенотипического и социального статуса человека [6]. Кроме этого, необходимо учитывать пол как возможный фактор влияния на выраженность показателей fNIRS. В качестве объекта исследования представляется целесообразным привлечение студенческой молодёжи как группы населения, наименее зависимой от негативного воздействия ситуативных факторов среды, способных повлиять на функциональное состояние центральной нервной системы.

Цель исследования. Охарактеризовать проявление стандартных показателей fNIRS у молодых людей, проживающих в различных условиях среды жизнедеятельности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования были отобраны студенты государственных вузов, являющиеся коренными жителями трёх регионов европейской части России: Архангельской области (16 мужчин, средний возраст 20,1 года, SD 1,82; 17 женщин, средний возраст 18,8 года, SD 1,48), Волгоградской области (16 мужчин, средний возраст 20,4 года, SD 2,44; 17 женщин, средний возраст 19,8 года, SD 1,56) и Республики Крым (17 мужчин, средний возраст 19,3 года, SD 1,26; 17 женщин, средний возраст 19,9 года, SD 2,59). Всего было 49 мужчин и 51 женщина. Условиями включения студентов в выборочную совокупность являлось следующее: возраст 18–25 лет, достаточный для устойчивой сформированности функционального и структурного статуса организма, но не выходящий за рамки восходящего периода развития человека; отсутствие хронических соматических и неврологических заболеваний; наличие полной, социально благополучной родительской семьи; отсутствие финансовых и бытовых проблем. 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). Выбор модельных регионов был обусловлен разным географическим положением и существенным перепадом комфортности среды обитания. Степень комфортности — интегральный показатель, основанный на 30 параметрах окружающей среды, согласно данным Национального атласа России, для Архангельской области соответствует уровню дискомфортности (крайне интенсивный природный прессинг на здоровье людей), для Волгоградской области — уровню гипокомфортности (интенсивный природный прессинг на здоровье людей), для Республики Крым — уровню комфортности (умеренный природный прессинг на здоровье людей) [7].

Для оценки гемодинамического ответа коры головного мозга в ближнем инфракрасном диапазоне применяли прибор Cortivision Poton Cap C20 (Cortivision, Польша). Данный прибор наиболее широко используется в научных организациях как в Российской Федерации, так и за рубежом, в том числе при выполнении физиологических исследований на Международной космической станции компанией Axiom Space (Хьюстон, США), сотрудничающей с НАСА. Прибор сертифицирован и соответствует требованиям технического регламента Евразийского экономического союза (ЕАЭС N RU Д-PL.PA03.B.20841/21 от 03.12.2021, срок действия — до 02.12.2026). Cortivision Poton Cap C20 укомплектован 20 оптодами (10 источников и 10 детекторов) с частотой дискретизации 7,8125 Гц. Оптоды неинвазивно фиксируются на голове обследуемого путём установки в гнезда эластичной шапочки «Easycap». При этом 8 пар оптодов размещались 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); ещё 2 пары оптодов были размещены для исследования префронтальной области коры (AF3 и AF4) (табл. 1).

Схема исследования включала в себя 3 этапа: 1-й этап — фон fNIRS с открытыми глазами (30′); 2-й этап — предъявление теста «Простая зрительно-моторная реакция» (2′) + предъявление теста «Сложная зрительно-моторная реакция» (2′) + предъявление теста «Крепелин» (3′); 3-й этап — постнагрузочные значения fNIRS с открытыми глазами (1′). Для последующего анализа данных учитывали среднеарифметические значения показателей концентрации HbO и HbR (ммоль/л) на этапе фона и постнагрузочных значений fNIRS. Статистическую обработку результатов проводили в программе SPSS для Windows (ver. 20). Потенциальное влияние среды обитания на функциональное состояние центральной нервной системы жителей модельных регионов (Архангельская и Волгоградская области, Республика Крым) оценивали посредством однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). В качестве основных характеристик распределения признаков использовали следующие значения: среднее арифметическое (M); ошибка среднего (m); медиана (Me); интервальный размах (Q25, Q75). Нормальность распределения первичных данных определяли по критерию Колмогорова–Смирнова. Полученные результаты свидетельствовали о ненормальном распределении значений исследуемых показателей, что послужило основанием для использования непараметрических методов статистики для последующего анализа данных. Для сравнительной оценки половых различий по показателям fNIRS применяли *U*-критерий Манна–Уитни, статистическую значимость различий принимали при $p < 0{,}05$.

Участие в исследовании было добровольным. До включения в исследование все участники выразили информированное согласие. Исследование проводилось в ноябре 2024 г. и было одобрено этическим комитетом Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова (Санкт-Петербург, Россия), протокол № 295 от 22.10.2024.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Наличие артефактов физического или биологического происхождения в результатах ЭЭГ или fNIRS послужило основанием для исключения из последующего статистического анализа 5 испытуемых женщин, в том числе двух представительниц Волгоградской области, двух

Таблица 1. Схема отведения оптодов функциональной ближней инфракрасной спектроскопии
Table 1. Optode placement scheme for functional near-infrared spectroscopy

Номер канала Channel No.	Тип датчика Sensor type	Соответствие датчика отведениям ЭЭГ Corresponding EEG electrode	Место съёма Recording site
1	Источник | Emitter	F4	Правая лобная кора Right frontal cortex
	Детектор | Detector	F6	
2	Источник | Emitter	F3	Левая лобная кора Left frontal cortex
	Детектор | Detector	F5	
3	Источник | Emitter	AF4	Правая лобная кора Right frontal cortex
	Детектор | Detector	AFp2	
4	Источник | Emitter	AF3	Левая лобная кора Left frontal cortex
	Детектор | Detector	AFp1	
5	Источник | Emitter	FTT8h	Правая височная кора Right temporal cortex
	Детектор | Detector	T8	
6	Источник | Emitter	FTT7h	Левая височная кора Left temporal cortex
	Детектор | Detector	T7	
7	Источник | Emitter	P3	Левая теменная кора Left parietal cortex
	Детектор | Detector	CPP5h	
8	Источник | Emitter	P4	Правая теменная кора Right parietal cortex
	Детектор | Detector	CPP6h	
9	Источник | Emitter	O1	Левая затылочная кора Left occipital cortex
	Детектор | Detector	OL1h	
10	Источник | Emitter	O2	Правая затылочная кора Right occipital cortex
	Детектор | Detector	OL2h	

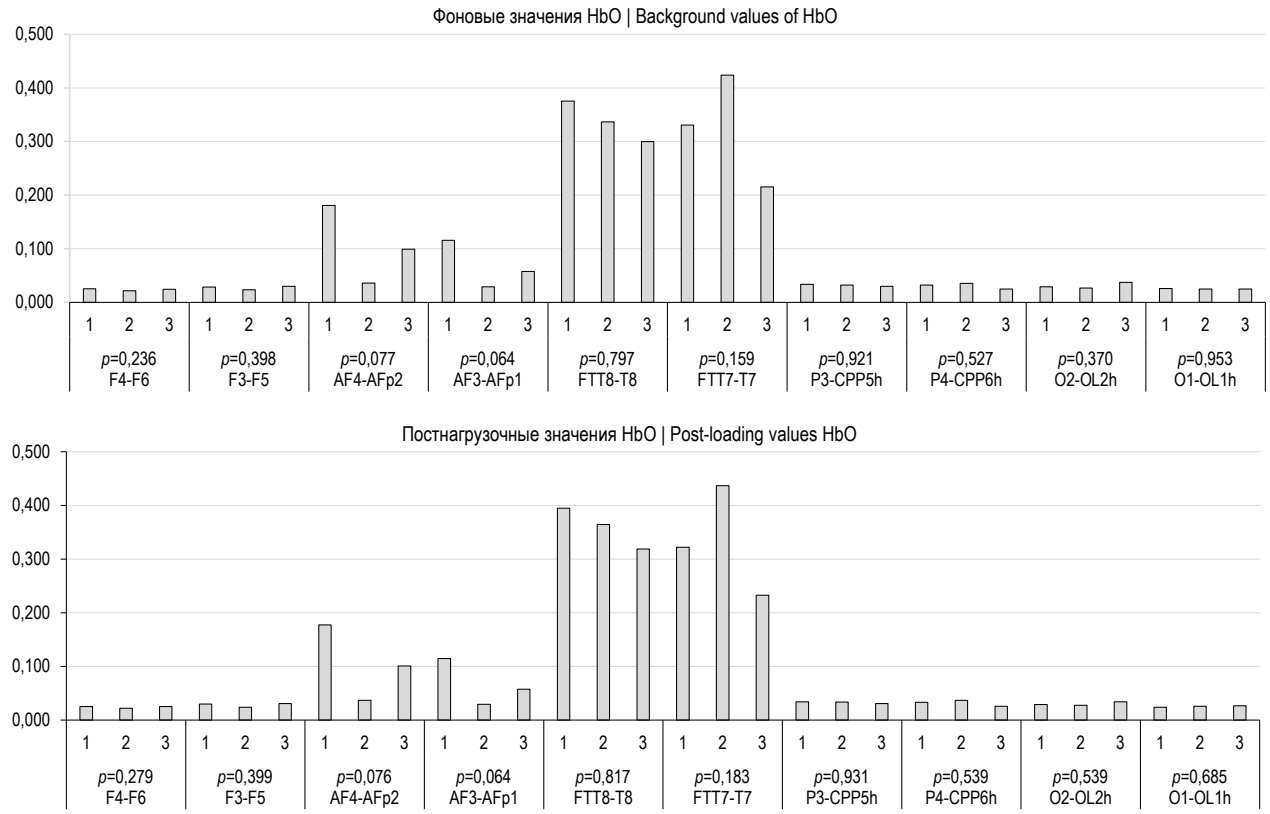

Рис. 1. Фоновые и постнагрузочные значения концентрации HbO (ммоль/л) в группах мужчин, проживающих в Архангельской области (регион 1), Волгоградской области (регион 2), Республике Крым (регион 3).

Fig. 1. Baseline and post-load HbO concentrations (mmol/L) in male groups residing in Arkhangelsk Oblast (Region 1), Volgograd Oblast (Region 2), and the Republic of Crimea (Region 3).

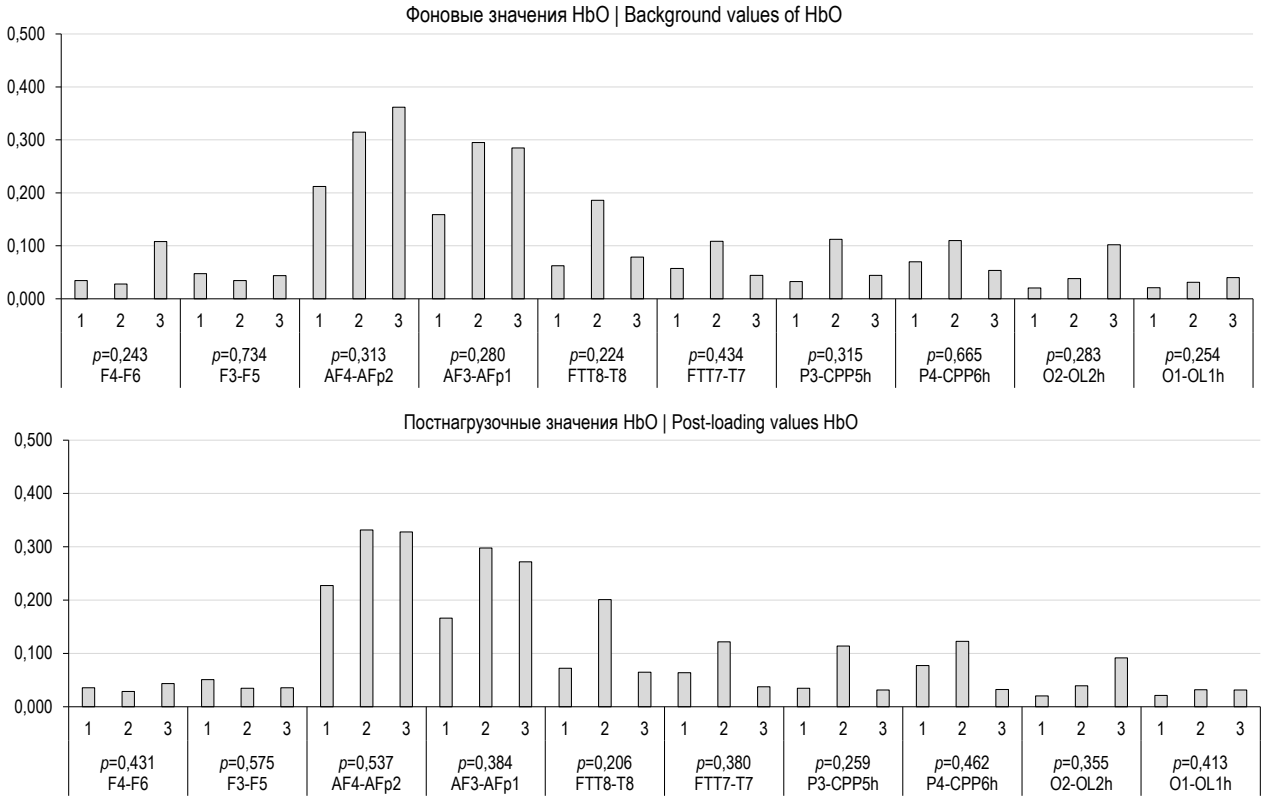

Рис. 2. Фоновые и постнагрузочные значения концентрации HbO (ммоль/л) в группах женщин, проживающих в Архангельской области (регион 1), Волгоградской области (регион 2), Республике Крым (регион 3).

Fig. 2. Baseline and post-load HbO concentrations (mmol/L) in female groups residing in Arkhangelsk Oblast (Region 1), Volgograd Oblast (Region 2), and the Republic of Crimea (Region 3).

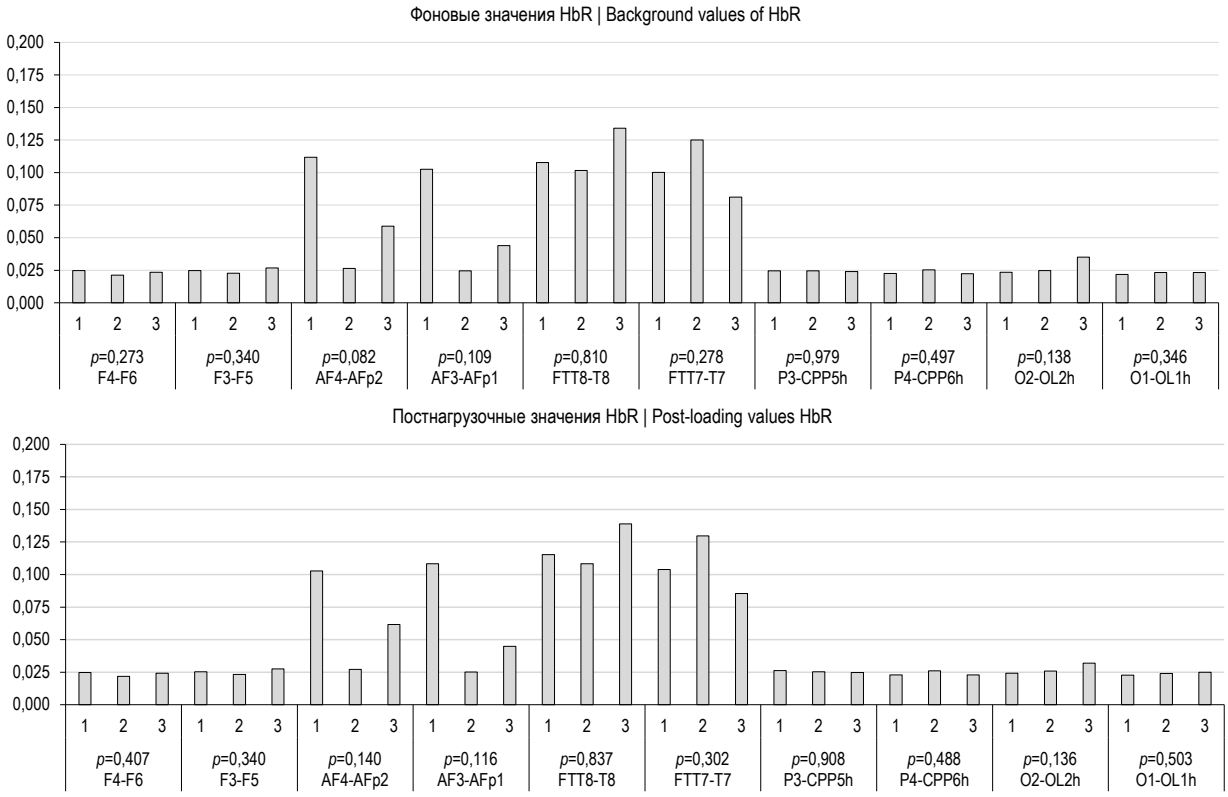

Рис. 3. Фоновые и постнагрузочные значения концентрации HbR (ммоль/л) в группах мужчин, проживающих в Архангельской области (регион 1), Волгоградской области (регион 2), Республике Крым (регион 3).

Fig. 3. Baseline and post-load HbR concentrations (mmol/L) in male groups residing in Arkhangelsk Oblast (Region 1), Volgograd Oblast (Region 2), and the Republic of Crimea (Region 3).

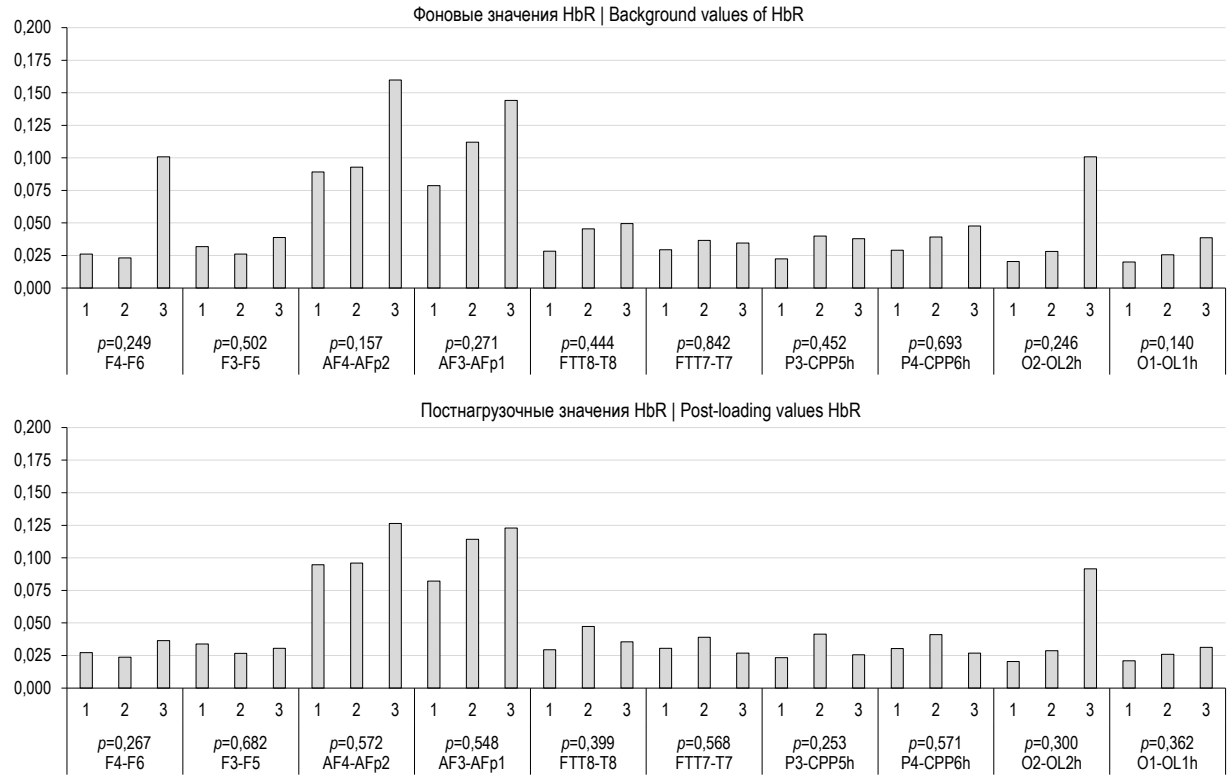

Рис. 4. Фоновые и постнагрузочные значения концентрации HbR (ммоль/л) в группах женщин, проживающих в Архангельской области (регион 1), Волгоградской области (регион 2), Республике Крым (регион 3).

Fig. 4. Baseline and post-load HbR concentrations (mmol/L) in female groups residing in Arkhangelsk Oblast (Region 1), Volgograd Oblast (Region 2), and the Republic of Crimea (Region 3).

представительниц Республики Крым и одной жительницы Архангельской области. Сравнительная выраженность фоновых и постнагрузочных значений показателей fNIRS с учётом региональной принадлежности испытуемых отражена на рис. 1–4 (HbO в группах мужчин и женщин, HbR в группах мужчин и женщин). По каждому из 10 каналов fNIRS методом однофакторного дисперсионного анализа выполнен расчёт *p*-значения различий исследуемых показателей между выборочными совокупностями модельных регионов (1 — Архангельская область, 2 — Волгоградская область, 3 — Республика Крым).

В табл. 2 представлены результаты сравнительного анализа фоновых значений показателей fNIRS по каждому отведению между выборочной совокупностью всех мужчин и всех женщин, ставших участниками исследования.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ региональной выраженности фоновых и постнагрузочных значений показателей fNIRS не выявил статистически значимых различий между представителями населения модельных регионов, характеризующихся существенным перепадом уровня комфортности среды обитания (Архангельская область — 6 баллов, Волгоградская область — 17 баллов, Республика Крым — 25 баллов) [6]. Также не выявлено статистически значимых различий между фоновыми и постнагрузочными значениями исследуемых показателей в рамках каждого модельного региона. При этом полученные результаты подтверждают данные недавнего исследования Khan и соавт. [8] о сходстве фоновых значений HbR и HbO. Отсутствие значимых различий содержания HbO и HbR между региональными выборками испытуемых, проживающих на территориях с различным уровнем комфортности среды обитания, вероятно, обусловлено относительной генетической и фенотипической однородностью славянского населения Архангельской, Волгоградской областей и Республики Крым. В ранее выполненных собственных исследованиях по ряду показателей генетического и фенотипического статуса подтверждена однородность жителей данных территорий [9, 10]. Некоторые изученные гены (*COMT*, *CACNA1D*, *CACNA2D3*) обусловливают регуляцию сосудистого тонуса и церебрального кровотока [11–13]. Это подтверждает отсутствие генетических предпосылок к выраженным

Таблица 2. Сравнительная характеристика выраженности фоновых значений показателей функциональной ближней инфракрасной спектроскопии между выборочной совокупностью мужчин и выборочной совокупностью женщин

Table 2. Comparative characteristics of baseline functional near-infrared spectroscopy values between male and female sampled groups

Отведения Leads	HbO, ммоль/л (M±m); Me (p25; p75) HbO (mmol/L), M±m; Me (Q25; Q75)		*p*	HbR, ммоль/л (M±m); Me (p25; p75) HbR(mmol/L), M±m; Me (Q25; Q75)		*p*
	Мужчины Men (n=49)	Женщины Women (n=46)		Мужчины Men (n=49)	Женщины Women (n=46)	
F4-F6	0,0230±0,0009; 0,021 (0,021; 0,024)	0,0560±0,0214; 0,023 (0,020; 0,037)	**0,037**	0,0230±0,0009; 0,021 (0,020; 0,022)	0,0490±0,0213; 0,021 (0,020; 0,026)	0,346
F3-F5	0,0270±0,0022; 0,022 (0,021; 0,025)	0,0410±0,0070; 0,023 (0,021; 0,034)	0,167	0,0240±0,0012; 0,022 (0,021; 0,023)	0,0320±0,0044; 0,022 (0,021; 0,027)	0,926
AF4-AFp2	0,1060±0,0297; 0,032 (0,024; 0,077)	0,2960±0,0402; 0,202 (0,068; 0,475)	**<0,001**	0,0660±0,0179; 0,025 (0,022; 0,05)	0,1130±0,0167; 0,077 (0,034; 0,160)	**<0,001**
AF3-AFp1	0,0680±0,0175; 0,026 (0,022; 0,067)	0,2470±0,0383; 0,136 (0,049; 0,336)	**<0,001**	0,0580±0,0178; 0,022 (0,021; 0,042)	0,1110±0,0162; 0,065 (0,029; 0,175)	**<0,001**
FTT8-T8	0,3380±0,0507; 0,153 (0,059; 0,621)	0,1100±0,0318; 0,025 (0,021; 0,063)	**<0,001**	0,1140±0,0237; 0,060 (0,028; 0,16)	0,0410±0,0070; 0,022 (0,021; 0,027)	**<0,001**
FTT7-T7	0,3230±0,0493; 0,179 (0,045; 0,69)	0,0700±0,0215; 0,022 (0,021; 0,028)	**<0,001**	0,1020±0,0124; 0,071 (0,026; 0,176)	0,0330±0,0050; 0,021 (0,021; 0,023)	**<0,001**
P3-CPP5h	0,0320±0,0041; 0,023 (0,021; 0,028)	0,0640±0,0230; 0,021 (0,021; 0,027)	0,302	0,0240±0,0013; 0,022 (0,021; 0,023)	0,0330±0,0061; 0,021 (0,020; 0,022)	0,142
P4-CPP6h	0,0310±0,0043; 0,022 (0,021; 0,03)	0,0780±0,0259; 0,022 (0,021; 0,029)	0,923	0,0230±0,0012; 0,021 (0,021; 0,022)	0,0380±0,0086; 0,021 (0,02; 0,022)	0,155
O2-OL2h	0,0300±0,0036; 0,025 (0,023; 0,027)	0,0530±0,0217; 0,022 (0,02; 0,028)	0,050	0,0270±0,0029; 0,023 (0,022; 0,026)	0,0490±0,0213; 0,022 (0,02; 0,025)	0,271
O1-OL1h	0,0250±0,0012; 0,022 (0,021; 0,025)	0,0300±0,0046; 0,021 (0,02; 0,023)	**0,035**	0,0220±0,0005; 0,021 (0,021; 0,023)	0,0270±0,0039; 0,021 (0,02; 0,022)	0,066

Примечание. Значения *p*, соответствующие статистической значимости, выделены полужирным.

Note. The *p*-values corresponding to statistical significance are shown in bold.

различиям структурных и функциональных свойств головного мозга у представителей населения исследуемых территорий.

Вместе с тем наглядно проявляются различия фоновой выраженности показателей fNIRS между выборочной совокупностью мужчин и выборочной совокупностью женщин, участвовавших в исследовании. Обращает на себя внимание повторяемость однонаправленных отличий между мужчинами и женщинами, обнаруженных в фоновых значениях HbO и HbR в одних и тех же областях коры головного мозга. В обоих случаях статистически значимые различия концентраций были определены в симметричных лобных (AF4-AFp2, AF3-AFp1) и височных (FTT8-T8, FTT7-T7) отведениях. При этом в выборке женщин зарегистрированы более высокие значения показателей в лобных отделах коры больших полушарий, а у мужчин, наоборот, концентрации изучаемых форм гемоглобина были выше в височных отделах. Важно отметить, что речь в данном случае идёт не о перераспределении концентраций HbO и HbR вследствие активации различных областей головного мозга, что сопровождалось бы разнонаправленными отличиями показателей, а о более высоких значениях содержания общего гемоглобина в височных отделах у мужчин и в лобных отделах у женщин.

Вероятным обоснованием обнаруженных половых различий могут быть не функциональные особенности работы структур головного мозга, а, скорее всего, морфофизиологические особенности мужского и женского организма. Одним из базовых различий в концентрации гемоглобина у мужчин и женщин является его зависимость от уровня половых гормонов. Широко известно, что в присутствии андрогенов происходит стимуляция эритропоэза, что, в частности, приводит к более высоким значениям числа эритроцитов и концентрации гемоглобина у мужчин по сравнению с женщинами (8,56–11,17 и 7,51–9,37 ммоль/л соответственно). Аналогичные отличия были выявлены с использованием методики fNIRS в исследованиях R.L.D. Kan и соавт. [14] и H. Auger и соавт. [15]. Однако влиянием только гормонального фона не может быть объяснена специфика в локализации выявленных различий.

Другим фактором возможного влияния на регистрацию показателей fNIRS являются особенности регионального кровоснабжения. В литературе имеются данные, указывающие на существующие половые различия гемодинамических характеристик мозговых артерий, питающих ткани головного мозга [16]. Так, у лиц мужского и женского пола различаются диаметр внутренних сонных артерий, объёмная скорость кровотока и параметры сосудистого сопротивления. Эти же различия характерны и для средней мозговой артерии, которая питает ткани лобной и височной долей головного мозга.

В качестве потенциальной причины различий выраженности показателей fNIRS у мужчин и женщин является половая специфика развития жевательных мышц головы, в особенности височной (лат. *musculus temporalis*), тело которой располагается в зоне височных отведений оптодов. Развитие скелетной мускулатуры подвержено воздействию со стороны мужских половых гормонов, что приводит к росту её массы и силы [17]. Исследования с использованием методики fNIRS подтверждают, что мужчины, обладая большей мышечной массой и более активными метаболическими процессами в них, действительно отличаются от женщин по регистрируемым показателям HbO и HbR [18].

Наконец, нельзя исключать различия в толщине и структуре тканей головы у мужчин и женщин. Методика fNIRS основана на проникновении лучей ближнего инфракрасного диапазона сквозь ткани головы (кожу, подкожно-жировую клетчатку, фасции, кости черепа) и поглощению их молекулами гемоглобина, концентрация которого рассчитывается как разность в интенсивности светового пучка на выходе (источник) и входе (детектор) [19]. Несмотря на то что ткани головы практически прозрачны для света в этом диапазоне, увеличение их толщины может приводить к излишнему поглощению и рассеиванию лучей и, как следствие, к снижению значений регистрируемых показателей. В этой связи важно отметить, что мужчины обладают более развитым слоем жировой ткани, а также более толстой лобной костью черепа, что используется в антропологических исследованиях для подтверждения половой принадлежности [20, 21].

Таким образом, следует признать отсутствие однозначного определения причин различий выраженности стандартных показателей fNIRS между мужчинами и женщинами. Видимо, это результат полифакторного влияния специфики эндогенных фенотипических особенностей организма мужчин и женщин, связанных с проявлением физических эффектов в технологии fNIRS. Тем не менее результаты выполненного исследования конкретизируют значения стандартных показателей fNIRS с учётом пола человека.

Ограничения исследования. Представленное исследование имеет определённые ограничения. Одним из них является сравнительно малый объём выборочной совокупности, не отвечающий требованиям организации поперечного исследования [22]. Для более точного и обобщающего анализа региональной выраженности фоновых и постнагрузочных значений показателей fNIRS в последующем необходимо увеличить количество участников исследования. Результаты работы не могут распространяться на детей и подростков, пожилых людей, лиц с хроническими соматическими и неврологическими заболеваниями. Нельзя не отметить, что данное исследование ограничено территориями трёх регионов, физико-географические характеристики которых не охватывают всего реально существующего спектра климатических особенностей европейской части России. Отсутствие аналогичных исследований в границах территории Российской

Федерации и нормативных значений показателей fNIRS не позволяет полноценно интерпретировать эмпирически полученные результаты, не имеющие «точки отсчёта». Результаты предпринятого исследования определяют целесообразность дальнейшего всестороннего изучения и проверки на других группах населения в различных физико-географических, биогеохимических и социальных условиях среды, региональной выраженности фоновых и постнагрузочных значений показателей fNIRS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предпринятое исследование определило отсутствие статистически значимых различий выраженности фоновых и постнагрузочных значений показателей fNIRS между представителями населения модельных регионов европейской части России, характеризующихся существенным перепадом уровня комфортности среды обитания. Вероятнее всего, это обусловлено относительной генетической и фенотипической однородностью славянского населения Архангельской, Волгоградской областей и Республики Крым. Также не определено статистически значимых различий между фоновыми и постнагрузочными значениями исследуемых показателей в рамках каждого модельного региона. Выявленные различия в значениях фоновой концентраций HbO и HbR между выборочной совокупностью мужчин и выборочной совокупностью женщин подтверждают необходимость учёта пола при выполнении исследований fNIRS. Представленные данные будут способствовать повышению надёжности и воспроизводимости результатов исследований, выполненных с использованием технологии fNIRS, и тем самым стимулировать внедрение передовых методов нейровизуализации функций мозга в исследовательскую деятельность и клиническую практику.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.Б. Мулик — концепция и дизайн исследования, анализ данных, редактирование статьи; И.В. Улесикова — сбор материала и первичная обработка результатов исследования; Н.О. Назаров — статистическая обработка результатов исследования; М.А. Кунавин — сбор материала и первичная обработка результатов исследования; А.Г. Соловьёв — анализ данных и интерпретация результатов исследования; Ю.А. Шатыр — обзор литературы, написание текста. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведения исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова (Санкт-Петербург, Россия), протокол № 295 от 22.10.2024.

Согласие на публикацию. Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках реализации НИР по программе академического стратегического лидерства «Приоритет-2030».

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: A.B. Mulik: conceptualization, formal analysis, writing—review & editing; I.V. Ulesikova: investigation; N.O. Nazarov: formal analysis; M.A. Kunavin: investigation; A.G. Soloviev: formal analysis, interpretation of results; Yu.A. Shatyr: sources review, writing—original draft. All authors confirm that their authorship meets the ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication).

Ethics approval: The study was approved by the Local Ethics Committee of the S.M. Kirov Military Medical Academy (Saint Petersburg, Russia), Protocol No. 295 dated October 22, 2024.

Consent for publication: All participants provided written informed consent prior to inclusion in the study.

Funding sources: This work was part of the Priority 2030 Strategic Academic Leadership Program.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

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;63(2):921–935. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.03.049
2. Yücel MA, Lühmann A, Scholkmann F, et al. Best practices for fNIRS publications. *Neurophotonics*. 2021;8(1):101–108. doi: 10.1117/1.NPh.8.1.012101
3. Komleva YuK, Salmina AB, Prokopenko SV, et al. Changes in structural and functional plasticity of the brain induced by environmental

enrichment. *Annals of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2013;68(6):39–48. doi: 10.15690/vramn.v68i6.672 EDN: QCVRFD
4. Miguel PM, Pereira LO, Silveira PP, Meaney MJ. Early environmental influences on the development of children's brain structure and function. *Dev Med Child Neurol*. 2019;61(10):1127–1133. doi: 10.1111/dmcn.14182
5. Smith L. Integrating the physical environment within a population neuroscience perspective. *Curr Top Behav Neurosci*. 2024;68:223–238. doi: 10.1007/7854_2024_477
6. Mulik AB, Ulesikova IV, Mulik IG, et al. Comfort and aesthetics of the living environment as a determinant of an individual's phenotypic and social status. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;26(2):31–38. doi: 10.33396/1728-0869-2019-2-31-38 EDN: XLUHZE
7. Characteristics of the sanitary system. In: *National Atlas of Russia*. Vol. 2. Nature. Ecology. Moscow; 2007. [cited 2025 Mar 20]. Available from: http://xn--80aaaa1bhnclcci1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/447/447 (In Russ.)
8. Khan AF, Yuan H, Smith ZA, Ding L. Distinct time-resolved brain-wide coactivationsin oxygenated and deoxygenated hemoglobin. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2024;71(8):463–472. doi: 10.1109/TBME.2024.3377109
9. Shatyr YuA, Nazarov NO, Glushakov RI, et al. Search for genetic and phenotypical bases of human predisposition to risk behavior. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2023;9(3):291–299. EDN: ZOEYFS
10. Mulik AB, Shatyr YuA, Ulesikova IV, et al. Sexual characteristics of genetic determination of human propensity to aggressive, suicidal and addcitve behavior: descriptive study. *Marine medicine*. 2024;10(3):94–107. doi: 10.22328/2413-5747-2024-10-3-94-107 EDN: FJLHJI
11. Akil M, Kolachana BS, Rothmond DA, et al. Catechol-O-methyltransferase genotype and dopamine regulation in the human brain. J Neurosci. 2003;23(6):2008–2013. doi: 10.1523/JNEUROSCI.23-06-02008.2003
12. Pinggera A, Lieb A, Benedetti B, et al. CACNA1D de novo mutations in autism spectrum disorders activate Cav1.3 L-type calcium channels. Biol Psychiatry. 2015;77(9):816–822. doi: 10.1016/j.biopsych.2014.11.020
13. Dolphin AC. The α2δ subunits of voltage-gated calcium channels. Biochim Biophys Acta. 2013;1828(7):1541–1549. doi: 10.1016/j.bbamem.2012.11.019
14. Kan RLD. Sex differences in brain excitability revealed by concurrent iTBS/fNIRS. *Asian J Psychiatr*. 2024;(96):40–43. doi: 10.1016/j.ajp.2024.104043
15. Auger H, Bherer L, Boucher É, et al. Quantification of extra-cerebral and cerebral hemoglobin concentrations during physical exercise using time-domain near infrared spectroscopy. *Biomed Opt Express*. 2016;7(10):3826–3842. doi: 10.1364/BOE.7.003826
16. Filatova OV, Sidorenko AA. Age and sex hemodynamic characteristics of cerebral arteries. *Acta Biologica Sibirica*. 2015;1(3–4):199–243. EDN: VARUGZ
17. Ben Mansour G, Kacem A, Ishak M, et al. The effect of body composition on strength and power in male and female students. *BMC Sports Sci Med Rehabil*. 2021;13(1):130–150. doi: 10.1186/s13102-021-00376-z
18. Keller JL, Traylor MK, Gray SM, et al. Sex differences in NIRS-derived values of reactive hyperemia persist after experimentally controlling for the ischemic vasodilatory stimulus. *J Appl Physiol (1985)*. 2023;135(1):3–14. doi: 10.1152/japplphysiol.00174.2023
19. Kwashnjova KV, Iljukhina WA, Kryghanowskiy EV, Chistow AV. Near-infrared topography and spectroscopy in the study of brain activity. *Biotechnosfera*. 2013;2(26):1–5. EDN: REXRPN
20. Perlaza NA. Sex determination from the frontal bone: a geometric morphometric study. *J Forensic Sci*. 2014;59(5):1330–1332. doi: 10.1111/1556-4029.12467
21. Garcovich D, Gasco A, Lorenzo A, et al. Sex estimation through geometric morphometric analysis of the frontal bone: an assessment in pre-pubertal and post-pubertal modern Spanish population. *Int J Legal Med*. 2022;136(1):319–328. doi: 10.1007/s00414-021-02712-x
22. Kholmatova KK, Gorbatova MA, Kharkova OA, Grjibovski AM. Cross-sectional studies: planning, sample size, data analysis. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2016;23(2):49–56. doi: 10.33396/1728-0869-2016-2-49-56 EDN: VQGTNJ

ОБ АВТОРАХ

***Мулик Александр Борисович,** д-р биол. наук, профессор;
адрес: Россия, 194044, Санкт-Петербург,
ул. Академика Лебедева, д. 6;
ORCID: 0000-0001-6472-839X;
eLibrary SPIN: 8079-9698;
e-mail: mulikab@mail.ru

Улесикова Ирина Владимировна, канд. биол. наук;
ORCID: 0000-0001-9284-3280;
eLibrary SPIN: 9859-6036;
e-mail: ulesikovairina@mail.ru

Назаров Никита Олегович, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-0668-4664;
eLibrary SPIN: 9126-2809;
e-mail: naznik86@gmail.com

Кунавин Михаил Алексеевич, канд. биол. наук, доцент;
ORCID: 0000-0001-7948-1043;
eLibrary SPIN: 5271-0260;
e-mail: m.kunavin@narfu.ru

Соловьёв Андрей Горгоньевич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-0350-1359;
eLibrary SPIN: 2952-0619;
e-mail: asoloviev1@yandex.ru

AUTHORS' INFO

***Aleksandr B. Mulik,** Dr. Sci. (Biology), Professor;
address: 6 Akademika Lebedeva st, Saint Petersburg, Russia, 194044;
ORCID: 0000-0001-6472-839X;
eLibrary SPIN: 8079-9698;
e-mail: mulikab@mail.ru

Irina V. Ulesikova, Cand. Sci. (Biology);
ORCID: 0000-0001-9284-3280;
eLibrary SPIN: 9859-6036;
e-mail: ulesikovairina@mail.ru

Nikita O. Nazarov, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-0668-4664;
eLibrary SPIN: 9126-2809;
e-mail: naznik86@gmail.com

Mikhail A. Kunavin, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor;
ORCID: 0000-0001-7948-1043;
eLibrary SPIN: 5271-0260;
e-mail: m.kunavin@narfu.ru

Andrey G. Soloviev, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0002-0350-1359;
eLibrary SPIN: 2952-0619;
e-mail: asoloviev1@yandex.ru

Шатыр Юлия Александровна, канд. биол. наук, доцент;
ORCID: 0000-0001-9279-5282;
eLibrary SPIN: 2942-6250;
e-mail: yuliashatyr@gmail.com

Yulia A. Shatyr, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor;
ORCID: 0000-0001-9279-5282;
eLibrary SPIN: 2942-6250;
e-mail: yuliashatyr@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author